



**Igor Filipe  
Pedrosa  
Da Silva**

## **Avaliação da Qualidade de Micropeças Torneadas**





**Igor Filipe  
Pedrosa  
Da Silva**

## **Avaliação da Qualidade de Micropeças Torneadas**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro



Dedico este trabalho aos meus pais pelo grande esforço que fizeram para que eu pudesse frequentar e terminar este curso e pelo apoio e motivação que me deram.



## **o júri**

**Professor Doutor Francisco José Malheiro Queirós de Melo**

Professor associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

**Professor Doutor António Paulo Monteiro Baptista**

Professor associado com agregação da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

**Professor Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva**

Professor auxiliar com agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro





## **agradecimentos**

Em primeiro lugar quero agradecer ao Professor Doutor João Paulo Davim pela disponibilidade e apoio prestados ao longo de todo o trabalho.

Agradeço também ao Engenheiro António Festas pelos ensinamentos, esclarecimentos e ajuda prestada nas oficinas do Departamento de Engenharia Mecânica.

À família, pais e irmã, pelo esforço financeiro efectuado para eu poder frequentar e concluir essa fase da minha vida, e pelo acompanhamento e solidariedade demonstrado ao longo destes anos o meu sentido agradecimento.

Os amigos também foram uma presença muito importante, pelo esclarecimento, ajuda e motivação dados. A todos eles o meu obrigado.

Quero deixar um agradecimento especial ao Gonçalo Neves que foi incansável na ajuda prestada.



**palavras-chave**

Microtorneamento; acabamento de superfície; precisão dimensional; parâmetros e ferramentas de corte

**resumo**

No presente trabalho pretende-se estudar a possibilidade de microtorneamento de precisão num torno CNC convencional, recorrendo a ferramentas especiais para maquinagem de peças pequenas, em materiais como o aço e o alumínio. Foram verificados quais os efeitos dos parâmetros de corte tais como o avanço, a profundidade de corte, a geometria da ferramenta e a utilização de lubrificação na qualidade da superfície obtida. Foi estudado o diâmetro mínimo possível de maquinar. Finalmente foi efectuada uma peça modelo e avaliada a sua qualidade de superfície e precisão dimensional.



**keywords**

Micro-turning; surface finish; dimensional accuracy; cutting parameters and cutting tools

**abstract**

In this work is intended to evaluate precision micro turning in a conventional CNC lathe machine tool, using special tools for machining of small pieces in materials such as steel and aluminum. It was analyzed the effect of cutting parameters, such as feed rate, depth of cut, tool geometry and use of lubrication on the surface quality of the pieces obtained. Furthermore, it was evaluated the minimum admissible diameter in micro machining. Finally there were produced model pieces and it was evaluated their surface quality and dimensional accuracy.



# Índice

Lista figuras .....	III
Lista tabelas.....	VI
1. Introdução .....	1
1.1. Microtorneamento.....	2
1.2. Objectivos da Tese .....	3
1.3. Estrutura da Tese .....	4
2. Microtorneamento - revisão bibliográfica.....	7
2.1. Breve história do Torno.....	8
2.2. Torno para micromaquinagem.....	9
2.3. Estado da arte .....	10
2.4. Síntese .....	13
3. Metodologia experimental.....	15
3.1. Materiais utilizados.....	15
3.1.1. Aço AISI 1045 .....	15
3.1.2. Alumínio BS EN AW-2011 .....	16
3.2. Ferramentas.....	17
3.3. Torno CNC .....	19
3.4. Parâmetros .....	20
3.4.1. Velocidade de corte .....	20
3.4.2. Avanço.....	21
3.4.3. Profundidade de corte .....	21
3.4.4. Estratégia de maquinagem .....	21
3.4.5. Simulação numérica do microtorneamento .....	22
3.4.6. Índice de esbelteza.....	24
3.5. Métodos de caracterização de superfície .....	25
3.5.1. Rugosímetro .....	25
3.5.2. Microscópio de oficina .....	27
3.5.3. Microscópio óptico.....	27
3.5.4. Micrómetro digital .....	28
4. Resultados obtidos e sua discussão .....	31
4.1. Avaliação dos parâmetros.....	32
4.1.1. Microtorneamento do aço AISI 1045 .....	32
4.1.1.1. Rugosidade média aritmética (Ra) .....	32
4.1.1.2. Outros parâmetros de Rugosidade .....	35

4.1.1.3.	Análise de forma .....	36
4.1.2.	Microtorneamento do alumínio BS EN AW-2011 .....	39
4.1.2.1.	Rugosidade média aritmética (Ra) .....	39
4.1.2.2.	Outros parâmetros de rugosidade .....	41
4.1.2.3.	Avaliação da forma.....	42
4.1.3.	Optimização dos parâmetros de maquinagem .....	44
<b>4.2.</b>	<b>Geometria da ferramenta .....</b>	<b>47</b>
4.2.1.	Microtorneamento do aço.....	47
4.2.1.1.	Rugosidade média aritmética (Ra) .....	47
4.2.1.2.	Análise de forma .....	48
4.2.2.	Microtorneamento do alumínio.....	50
4.2.2.1.	Rugosidade média aritmética (Ra) .....	50
4.2.2.2.	Análise de forma .....	51
4.2.3.	Avaliação global .....	52
<b>4.3.</b>	<b>Lubrificação/Refrigeração da ferramenta .....</b>	<b>53</b>
4.3.1.	Microtorneamento do aço.....	53
4.3.1.1.	Rugosidade média aritmética (Ra) .....	53
4.3.1.2.	Análise de forma .....	54
4.3.2.	Micromaquinagem do alumínio.....	55
4.3.2.1.	Rugosidade média aritmética (Ra) .....	55
4.3.2.2.	Análise de forma .....	56
4.3.3.	Avaliação global .....	57
<b>4.4.</b>	<b>Miniaturização .....</b>	<b>58</b>
4.4.1.	Peça em escada.....	59
4.4.2.	Menor diâmetro obtido.....	63
4.4.2.1.	Peça de 0,75mm de diâmetro .....	66
4.4.3.	Formas mais complexas.....	67
<b>5.</b>	<b>Conclusões e trabalhos futuros .....</b>	<b>71</b>
<b>6.</b>	<b>Referências .....</b>	<b>73</b>
<b>7.</b>	<b>Anexos.....</b>	<b>75</b>



## Lista figuras

Figura 1-1: Campos de aplicação da micro manufactura, (MINAM, 2008). .....	2
Figura 1-2: Peça modelo efectuada.....	4
Figura 1-3: Peça modelo comparada a um clip e um fósforo .....	4
Figura 2-1: Esquema da evolução histórica do torno (Almeida, 2009), (Staudenmann, et al., 2010), (Borges, 2009), (Rettie, 2009) .....	8
Figura 2-2: Torno para microtorneamento na sua mala e sua vista mais aproximada, (Sumio, et al., 2002). .....	9
Figura 3-1: Porta-ferramenta SDJCL 2020K11 com a sua ferramenta DCMW-11T302 SM10 .....	17
Figura 3-2: Porta-ferramenta CTGPL 2020 K11com a ferramenta TPUN 110304 H13E.....	17
Figura 3-3: Porta-ferramenta LF 151.22 2020 40 e sua ferramenta N151.2-540-40-3B .....	18
Figura 3-4: Torno KMHP 50 da Kingsbury utilizado.....	19
Figura 3-5: Bucha e torreta do torno KMHP 50 .....	19
Figura 3-6: Velocidades de corte utilizadas nos testes.....	20
Figura 3-7: a) Corte longitudinal ao eixo b) Corte transversal ao eixo .....	22
Figura 3-8: a) $P=300\mu\text{m}$ e $a=100\mu\text{m/rot}$ no aço b) $P=50\mu\text{m}$ e $a=12,5\mu\text{m/rot}$ no aço .....	24
Figura 3-9: $P=300\mu\text{m}$ e $a=100\mu\text{m/rot}$ no alumínio .....	24
Figura 3-10: Relação $I/d$ .....	25
Figura 3-11: Rugosímetro Hommel Tester T1000 E .....	26
Figura 3-12: Pontos de medição da rugosidade .....	27
Figura 3-13: Microscópio de oficina Mitutoyo TM .....	27
Figura 3-14: Microscópio óptico Nikon Eclipse LV150.....	28
Figura 3-15: Micrómetro Mitutoyo MDC-25SB.....	28
Figura 3-16: Local das medidas efectuadas em cada peça.....	29
Figura 4-1: Plano de trabalho e análise de resultados.....	32

Figura 4-2: Rugosidade média aritmética do aço em função do avanço e da profundidade de corte.....	33
Figura 4-3: Aspecto superficial das peças torneadas em aço AISI 1045.....	34
Figura 4-4: Conicidade com cota por excesso e por defeito.....	36
Figura 4-5: Medidas das peças em aço maquinadas com profundidade de corte de a) 300 $\mu$ m, b) 100 $\mu$ m e c) 50 $\mu$ m para os diferentes avanços.....	36
Figura 4-6: Representação do ângulo $\beta$ calculado tendo em conta $\Delta d$ e $l$ .....	37
Figura 4-7: Rugosidade média aritmética do alumínio em função do avanço e da profundidade de corte.....	39
Figura 4-8: Aspecto superficial das peças em alumínio BS EN AW-2011 .....	40
Figura 4-9: Medidas das peças em alumínio maquinadas com profundidade de corte de a) 300 $\mu$ m, b) 100 $\mu$ m e c) 50 $\mu$ m para os diferentes avanços .....	42
Figura 4-10: Geometrias em estudo .....	47
Figura 4-11: Comparação de $R_a$ tendo em conta a profundidade de corte e o avanço no aço para as diferentes ferramentas .....	48
Figura 4-12: Avaliação de forma das peças maquinadas em aço com a) $P=100\mu$ m e $a=25\mu$ m/rot, b) $P=100\mu$ m e $a=12,5\mu$ m/rot e c) $P=50\mu$ m e $a=25\mu$ m/rot para as diferentes ferramentas.....	49
Figura 4-13: Comparação de $R_a$ tendo em conta a profundidade de corte e o avanço no alumínio .....	50
Figura 4-14: Avaliação de forma das peças maquinadas em alumínio com a) $P=100\mu$ m e $a=25\mu$ m/rot, b) $P=100\mu$ m e $a=12,5\mu$ m/rot e c) $P=50\mu$ m e $a=25\mu$ m/rot para as diferentes ferramentas.....	51
Figura 4-15: Valores de $R_a$ para as ferramentas rômica 55° e de sangrar, com e sem lubrificação, nas peças maquinadas em aço .....	54
Figura 4-16: Avaliação de forma das peças maquinadas em aço com a) $P=100\mu$ m e $a=25\mu$ m/rot, b) $P=100\mu$ m e $a=12,5\mu$ m/rot e c) $P=50\mu$ m e $a=25\mu$ m/rot para as ferramentas rômica 55° e de sangrar, com e sem lubrificação .....	54
Figura 4-17: Valores de $R_a$ para as ferramentas rômica 55° e de sangrar, com e sem lubrificação, nas peças maquinadas em alumínio.....	56
Figura 4-18: : Avaliação de forma das peças maquinadas em alumínio com a) $P=100\mu$ m e $a=25\mu$ m/rot, b) $P=100\mu$ m e $a=12,5\mu$ m/rot e c) $P=50\mu$ m e $a=25\mu$ m/rot para as ferramentas rômica 55° e de sangrar, com e sem lubrificação .....	56

Figura 4-19: Contacto entre a ferramenta de sangrar e a peça.....	59
Figura 4-20: Peça em escada.....	60
Figura 4-21: Superfície e rugosidade da peça C em escada em alumínio .....	60
Figura 4-22: Comparação entre a peça C em escada, um fósforo e um clip.....	62
Figura 4-23: Comparação entre a peça C em escada e um lápis de minas 0,5mm .	62
Figura 4-24: Relação entre o comprimento e o diâmetro da peça.....	64
Figura 4-25: Peça D em alumínio .....	65
Figura 4-26: Peça D em aço.....	65
Figura 4-27: Fotografias da superfície da peça A• em ambos os materiais.....	67
Figura 4-28: Cotas da micropeça modelo com geometria mais complexa [mm] .....	67
Figura 4-29: Peça com forma mais complexa comparada à peça com menor diâmetro obtido e ao lápis de minas de 0,5mm .....	68
Figura 4-30: Peça com a forma mais complexa comparada com objectos de uso comum como um fósforo e um clip.....	68

## Lista tabelas

Tabela 2-1: Parâmetros de corte e respectivos resultados, em termos de rugosidade de superfície e diâmetro mínimo .....	13
Tabela 3-1: Características químicas e propriedades do aço AISI 1045 .....	16
Tabela 3-2: Características químicas e propriedades do Alumínio BS EN AW-2011 .....	16
Tabela 3-3: Formato e ângulos das ferramentas e porta-ferramentas .....	18
Tabela 3-4: Avanços utilizados nos testes.....	21
Tabela 3-5: Profundidades de corte utilizadas nos testes .....	21
Tabela 3-6: Significado das forças .....	23
Tabela 3-7: Rugosidades e seu significado .....	26
Tabela 4-1: Melhores parâmetros e respectivos valores de Ra obtidos no aço AISI 1045.....	35
Tabela 4-2: Valores de todas as rugosidades medidas no aço em $\mu\text{m}$ .....	35
Tabela 4-3: Valores da função de avaliação de forma das peças em aço AISI 1045 .....	38
Tabela 4-4: Comparação entre os melhores resultados tendo em conta apenas Ra e tendo em conta apenas a forma no torneamento em aço .....	38
Tabela 4-5: Melhores parâmetros e respectivos valores de Ra obtidos no alumínio BS EN AW-2011 .....	41
Tabela 4-6: Valores das rugosidades do alumínio maquinadas com ferramenta rômica 55° .....	41
Tabela 4-7: Valores da função de avaliação de forma das peças em alumínio BS EN AW-2011.....	43
Tabela 4-8: Comparação entre os melhores resultados obtidos tendo em conta apenas Ra e tendo em conta apenas a forma no torneamento em alumínio .....	44
Tabela 4-9: Valor das constantes .....	44
Tabela 4-10: Valores dos máximos de cada rugosidade, valor de $\beta$ e da função (f) .....	45
Tabela 4-11: Parâmetros das melhores peças obtidas tendo em conta apenas Ra, apenas $\beta$ e a função (f).....	46
Tabela 4-12: Parâmetros escolhidos para o estudo da geometria e da lubrificação .....	47

Tabela 4-13: Valores da conicidade atingida com diferentes ferramentas .....	49
Tabela 4-14: Valores da conicidade nas peças em alumínio atingida com diferentes ferramentas .....	52
Tabela 4-15: Valores da avaliação global para ambos os materiais.....	53
Tabela 4-16: Valores da conicidade nas peças em aço atingida com e sem lubrificação .....	55
Tabela 4-17: Valores da conicidade nas peças em alumínio atingida com e sem lubrificação .....	57
Tabela 4-18: Valores da avaliação global para as ferramentas rômica 55° e de sangrar, com e sem lubrificação, para ambos os materiais .....	58
Tabela 4-19: Parâmetros escolhidos para a operação de miniaturização para ambos os materiais .....	59
Tabela 4-20: Diâmetros da peça em escada .....	60
Tabela 4-21: Rugosidades da peça C em escada do alumínio (valores em $\mu\text{m}$ ).....	61
Tabela 4-22: Medidas da miniaturização .....	63
Tabela 4-23: Valores da rugosidade da peça A• apresentados em $\mu\text{m}$ .....	66
Tabela 4-24: Medidas dos diâmetros da peça modelo .....	69



# Capítulo 1

---

## 1. Introdução

Ao longo das últimas décadas, as exigências na qualidade das peças produzidas, na redução da energia utilizada na sua produção, na miniaturização das mesmas e no custo de fabrico têm sofrido um aumento considerável. Requisitos esses que provocam uma constante pressão na melhoria dos processos de fabrico, levando ao aparecimento de novas ferramentas, novos processos de maquinagem e novas máquinas, (Alting et al.,2006).

A miniaturização de componentes mecânicos também tem sofrido melhorias consideráveis, quer no método de fabrico quer na qualidade exigida e produzida, começando agora a fazer o caminho de miniaturização como aconteceu anteriormente no campo da electrónica.

Como se pode observar na Figura 1-1, as principais áreas impulsionadoras do micro fabrico são as indústrias aeroespacial, electrónica, automóvel e biomédica entre outras.

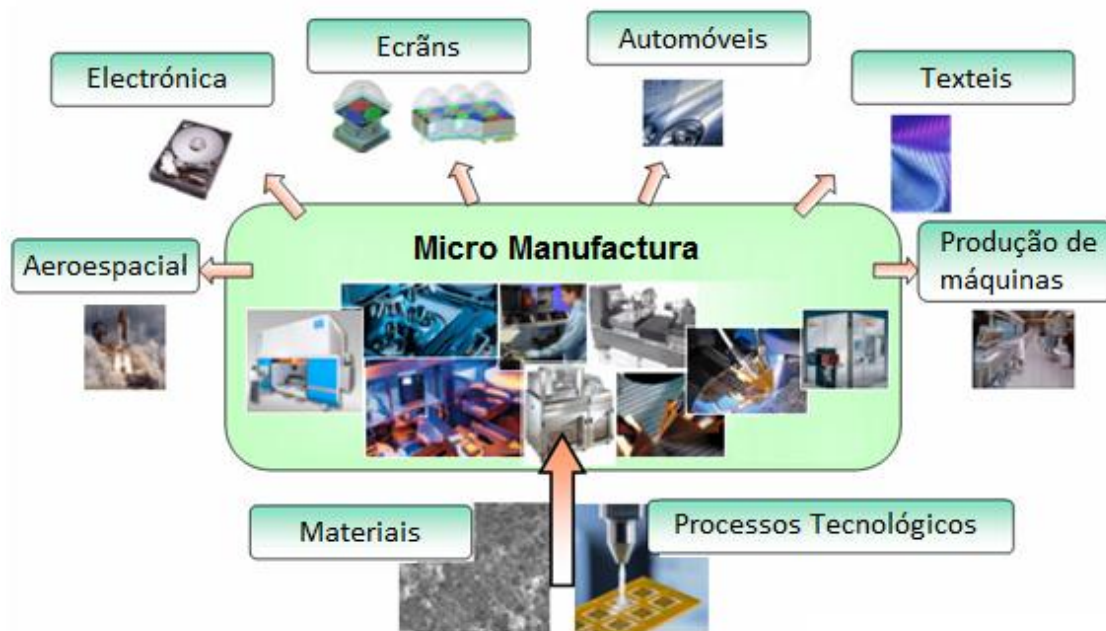


Figura 1-1: Campos de aplicação da micro manufatura, (MINAM, 2008).

Todas estas exigências e pressões têm levado a muitos estudos com o intuito de melhorar a produção de estruturas e componentes funcionais numa escala micrométrica, sendo os processos de maquinagem como o torneamento e a fresagem os principais alvos desses estudos, colocando-os como os processos convencionais melhor preparados para a miniaturização dos componentes.

O avanço da tecnologia de máquinas-ferramentas, especialmente com o desenvolvimento de máquinas CNC de alta precisão, contribui para alcançar formas muito finas e precisas com um bom acabamento. Assim, são preferencialmente utilizados estes processos que maquinam com ferramentas apropriadas para o fabrico de formas micrométricas complexas em 3D, (Egashira, 2002).

### 1.1. Microtorneamento

Um dos processos mais utilizados actualmente para a produção de micropeças na indústria é o torneamento.

Todos os tornos que foram desenvolvidos especificamente para a produção de peças na escala micrométrica são muito dispendiosos para a indústria portuguesa



pelo que é necessário encontrar soluções economicamente mais viáveis que permitam atingir a qualidade e tamanhos pretendidos. Como tal começou a ser estudada a hipótese de se efectuar micromaquinagem em tornos CNC convencionais que apresentem grande precisão e velocidades de rotação elevadas.

No estudo dos parâmetros de corte (avanço, profundidade de corte e velocidade de corte) a geometria das ferramentas disponíveis e o tipo de material a utilizar têm de ser analisados caso a caso, pois cada torno e cada material a maquinar têm características específicas que levam a parâmetros de maquinagem diferentes.

Apesar de não atingir as dimensões e qualidade superficial que se atingem em tornos especializados para microtorneamento, os tornos CNC convencionais permitem obter peças 10 a 100 vezes inferiores ao seu tamanho original, pelo que a sua utilização pode tornar-se uma boa solução, (Coelho, et al., 2007).

## **1.2. Objectivos da Tese**

Devido ao facto de os tornos específicos para microtorneamento serem muito dispendiosos para a indústria portuguesa, é necessário encontrar alternativas mais acessíveis que produzam peças com dimensões e qualidade de superfície apropriada para o fim requerido.

Os objectivos a atingir na realização deste estudo utilizando um torno CNC convencional são:

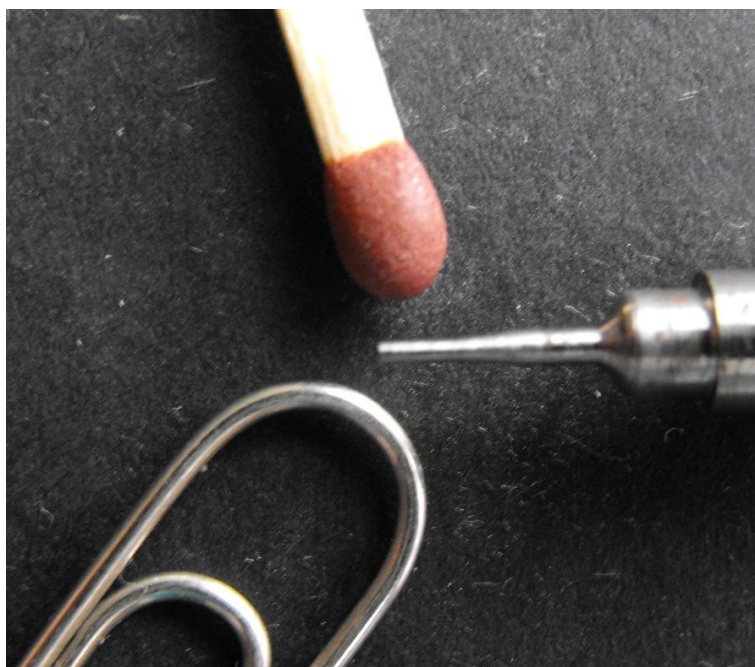
- Mostrar a combinação de avanço e profundidade de corte, para os quais se obtêm os melhores resultados para cada um dos materiais em estudo, utilizando a máxima velocidade de corte;
- Averiguar qual a melhor geometria da ferramenta para este tipo de maquinagem, bem como a melhor estratégia;
- Verificar qual a vantagem na utilização de fluido de corte;
- Determinar o diâmetro mínimo plausível de ser maquinado;
- Verificar se é possível efectuar peças com geometrias complexas.

A Figura 1-2 apresenta a peça com forma mais complexa que foi possível maquinar.



**Figura 1-2: Peça modelo efectuada**

Na Figura 1-3 a peça modelo é comparada a objectos de uso comum como um fósforo e um clip.



**Figura 1-3: Peça modelo comparada a um clip e um fósforo**

### **1.3. Estrutura da Tese**

Na presente introdução descreve-se o torneamento em geral, a sua evolução e miniaturização. São também aqui descritos os objectivos a atingir e a estrutura da presente dissertação.

No segundo capítulo apresenta-se a revisão bibliográfica. É referido um breve resumo histórico do torneamento e abordado o estado da arte deste processo tecnológico, com especial ênfase na miniaturização.

No terceiro capítulo é descrita a metodologia experimental, os materiais, os parâmetros, as ferramentas e o torno CNC utilizado. Nesta secção são também expostos os métodos de caracterização, entre eles a simulação numérica através do método dos elementos finitos.

No quarto capítulo são analisados os resultados da alteração da profundidade de corte, do avanço, da geometria da ferramenta e da utilização de fluido refrigerante, na produção de um cilindro com 10mm de comprimento por 2mm de diâmetro. Os resultados obtidos levaram à escolha dos melhores parâmetros, da geometria da ferramenta mais adequada e da necessidade, ou ausência dela, de utilização de fluido refrigerante, que foram utilizados na miniaturização e posterior produção de peças com geometrias mais complexas. Os resultados obtidos nessa miniaturização estão descritos neste capítulo.

Finalmente, no quinto capítulo são apresentadas as conclusões e sugeridos trabalhos futuros.



## Capítulo 2

---

### **2. Microtorneamento - revisão bibliográfica**

O microtorneamento é um processo de maquinagem relativamente recente que consiste num processo em tudo idêntico ao torneamento convencional, mas miniaturizado em termos de máquinas e ferramentas, com o objectivo de obter micropeças. A evolução deste processo não alterou significativamente o seu princípio de funcionamento, tendo a capacidade de produzir estruturas funcionais em 3D numa escala micrométrica utilizando ferramentas de corte contínuo. Para controlar com precisão e exactidão as operações de corte são gerados programas CNC. A principal desvantagem deste processo é que a força de maquinagem tem de ser menor do que a força de deformação elástica do material a maquinar para evitar deformações das peças, sendo esse, um dos principais factores que influenciam a precisão no microtorneamento, (Rahman, et al., 2005), (Prasad, 2007).

## 2.1. Breve história do Torno

Desde a pré-história que o Homem utiliza e desenvolve ferramentas para o auxiliar nas suas tarefas. As primeiras ferramentas foram desenvolvidas na Idade da Pedra. Após a descoberta dos metais, as ferramentas de pedra foram substituídas por ferramentas metálicas. Da necessidade de criar um movimento de rotação das peças ou da própria ferramenta para auxiliar o Homem a trabalhar os metais surgem máquinas-ferramentas rudimentares, nomeadamente o torno arco de violino (ainda utilizado residualmente em alguns países). Na Figura 2-1 podemos observar as principais evoluções dos tornos.

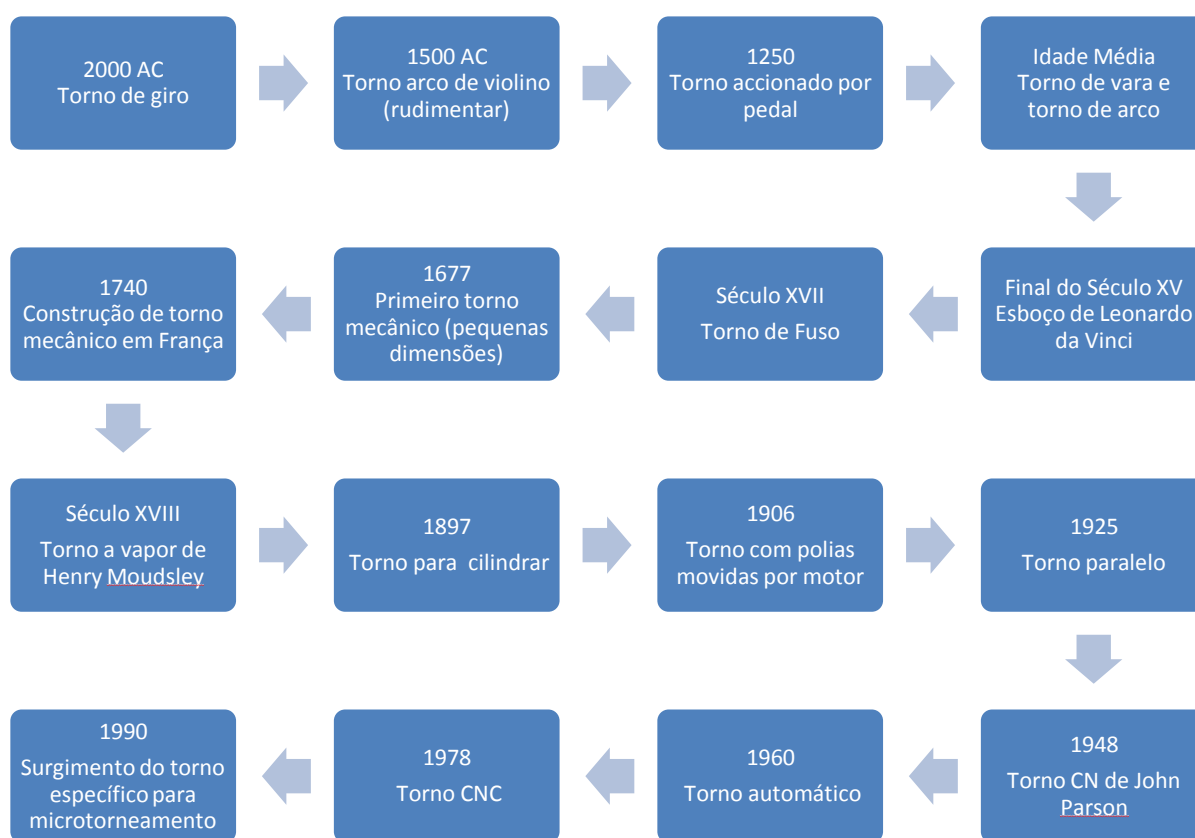


Figura 2-1: Esquema da evolução histórica do torno (Almeida, 2009), (Staudenmann, et al., 2010), (Borges, 2009), (Rettie, 2009)

Notar que o primeiro torno mecânico surgiu por volta de 1677, o torno CN surgiu na década de 50 e os primeiros tornos dedicados ao microtorneamento surgiram na década de 90.

## 2.2. Torno para micromaquinagem

A grande maioria das demonstrações de micromaquinagem têm sido realizadas em máquinas convencionais, com maior precisão dimensional, ou em máquinas especiais de pesquisa.

Na actualidade a maioria das aplicações de micromaquinagem necessitam de um longo tempo de “set up” da máquina e da operação. A detecção do contacto ferramenta-peça é extremamente difícil e o tempo de maquinagem é longo devido à baixa capacidade de remoção. Têm sido realizadas tentativas de adicionar vibração de ultra-sons à ferramenta com a finalidade de se melhorar a capacidade de remoção, porém foram somente testadas em laboratórios, sob condições muito controladas. Uma limitação das máquinas-ferramentas convencionais para aplicações em micromaquinagem é o limite de rotação do eixo-árvore, (Coelho, et al., 2007).

Para tentar superar essas limitações, Sumio et al., (2002) criaram um sistema de microtorneamento de precisão (MTS), representado na Figura 2-2. Este torno tem uma base com 150 x 100mm de tamanho, um controlo CNC, com interpolação linear e circular. O MTS foi desenvolvido para ser um substituto dos tornos CNC convencionais que são pesados, têm grandes dimensões e têm elevada potência (mesmo para peças muito pequenas). Este torno consegue maquinar bronze com uma rugosidade de  $0,20\mu\text{m}$  e uma circularidade de  $0,19\mu\text{m}$ .

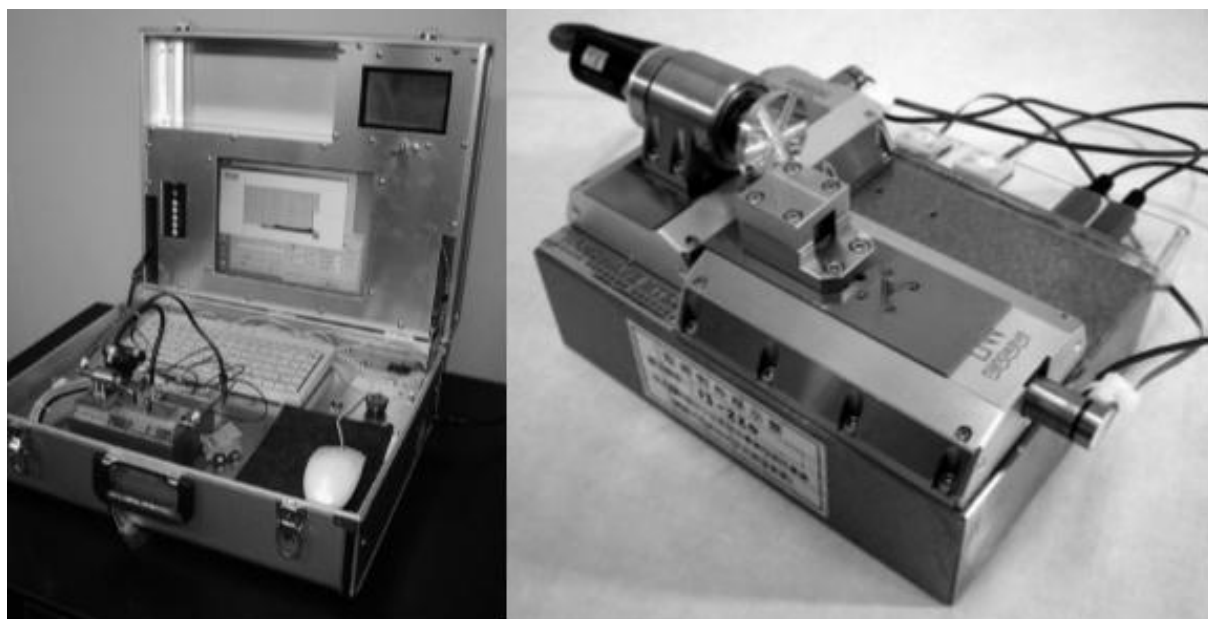


Figura 2-2: Torno para microtorneamento na sua mala e sua vista mais aproximada, (Sumio, et al., 2002).

O MTS é composto por uma base, tem dois eixos, o X e o eixo principal Z, que são accionados por correias de 0,2mm de passo, tem um porta-ferramentas e o motor tem 22mm de diâmetro e atinge as 10000rpm. Foi projectado para ter grande rigidez e menos vibração para maquinagem de precisão de peças pequenas, sendo o diâmetro máximo inicial dos provetes de 5mm, (Sumio, et al., 2002).

Existem outros tornos que foram desenvolvidos para a micromaquinagem como o sistema de microtorneamento desenvolvido por Lu & Yoneyama (1999) que atinge as 15000rpm onde conseguiram maquinar diâmetros de 10 $\mu$ m.

### **2.3. Estado da arte**

O microtorneamento é um processo relativamente recente e têm surgido vários estudos relacionados com este tema.

Lu & Yoneyama (1999) desenvolveram um sistema de microtorneamento com o qual maquinaram uma peça de 0,3mm de diâmetro até obterem um diâmetro de 10 $\mu$ m utilizando uma rotação de 15000rpm. O microtorno tem cerca de 200mm x 200mm o que viabiliza a sua colocação num microscópio óptico permitindo observar e controlar todo o processo de maquinagem. Nas suas investigações utilizaram uma ferramenta com ponta de diamante. As forças de corte foram investigadas recorrendo a um sensor tridimensional de força. Outro estudo efectuado foi o de verificar a possibilidade de redução da força com o intuito de melhorar a precisão do trabalho. Verificaram que as forças de corte não ultrapassavam os 14mN e que para obterem um cilindro de 10 $\mu$ m a força não podia superar os 0,4mN.

Sumio et al. (2002) utilizaram um sistema de microtorneamento (MTS) com uma base de 150mm x 100mm que está ligado a um computador, para maquinar vários materiais, entre os quais o alumínio, o aço, o aço inoxidável e o latão. O material onde obtiveram melhores resultados foi o latão com uma velocidade de corte de 23,6m/min (valores de Ra de 0,03 $\mu$ m e uma circularidade de 0,19 $\mu$ m). Com esse estudo verificaram que o MTS tem capacidade suficiente para ser um microtorno mecânico de precisão e que as micromáquinas têm potencial para integrar linhas de produção numa escala micrométrica.

Rahman et al. (2004) avaliaram a micromaquinabilidade do cobre, de uma liga de alumínio e de aço inoxidável, com ferramentas em PCD (diamante policristalino) e



cermets. Nesse estudo verificaram que o principal problema do microtorneamento é a força de corte que tende a deformar a peça. Para evitar esse problema efectuaram maquinagem por passos: primeiro maquinaram um cilindro, de seguida os cones e por último efectuaram a operação de sangrar. A programação da máquina-ferramenta é essencial ao sucesso da operação de microtorneamento. No estudo que efectuaram verificaram que o parâmetro que mais influenciou o corte no microtorneamento foi a profundidade de corte. Ao estudar a apara verificaram que a largura da mesma é superior à profundidade de corte, tendo uma superfície inferior regular e a superior com deformações. Ao aumentar a profundidade de corte, a apara torna-se ondulada e tende a enrolar. Com o aumento da velocidade de corte a apara tende a fracturar.

Alting et al. (2006) tentaram projectar e fabricar microprodutos em diversos materiais. Inicialmente exploraram o conceito de microprodutos e micro-engenharia apresentando os seus problemas típicos. Verificaram as possibilidades de “design” de ferramentas e máquinas para a produção de micropeças. No final pesquisaram o fabrico e montagem das micropeças/microprodutos. No estudo efectuado verificaram que os principais materiais a utilizar na micromaquinagem são os metais e os materiais cerâmicos. Confirmaram que as principais formas de micromaquinagem são os processos por arranque da apara como o microtorneamento e a microfresagem e os processos de ultra-sons como a electroerosão por fio.

Liu & Melkote (2006) basearam o seu trabalho num modelo de previsão da rugosidade da superfície no microtorneamento da liga Al5083-H116, que tem em conta o efeito do escoamento lateral plástico, a geometria da ferramenta e os parâmetros do processo de corte. As principais conclusões retiradas foram que o modelo de previsão desenvolvido está apto para prever a rugosidade da superfície torneada com pequenos avanços e pequenas profundidades de corte. A diferença entre a rugosidade teórica da superfície e a rugosidade realmente obtida deve-se ao escoamento lateral plástico. Esse efeito é causado pela tensão que a ponta da ferramenta provoca no material.

Asad et al. (2007) utilizaram um centro de maquinagem em miniatura com deslocamento máximo dos eixos de 210mm (X) x 110mm (Y) x 110mm (Z) que consegue efectuar operações de microtorneamento, microfresagem, microrectificação, micro EDM (maquinagem por electroerosão) e micro ECM

(maquinagem electroquímica), para efectuar as suas investigações com o intuito de levar ao limite a tecnologia do microfabrico. Utilizando uma ferramenta com insertos de PCD produziram, por microtorneamento, um varão em aço com 100 $\mu$ m de diâmetro. Esse varão foi posteriormente utilizado para o fabrico de dez micro-furos numa chapa de aço inoxidável com 100 $\mu$ m de espessura através do processo de micro EDM, ficando com um diâmetro de 22 $\mu$ m. Ao não conseguirem obter um eléctrodo tão pequeno como o obtido nas pesquisas efectuadas na NUS (Universidade Nacional de Singapura), onde conseguiram obter um eléctrodo com 4 $\mu$ m de diâmetro, utilizando o processo BEDG, recorreram a esse eléctrodo para efectuar furação numa chapa de aço inoxidável com 50 $\mu$ m de espessura conseguindo obter um furo com 6,5 $\mu$ m de diâmetro com boa qualidade de acabamento.

Gaitonde et al. (2009) investigaram a micromaquinabilidade da poliamida (PA66 GF30) reforçada com 30% de fibra de vidro utilizando ferramentas em PCD. Utilizaram a metodologia da resposta em superfície (RSM) baseada em modelos matemáticos não lineares, para analisar os efeitos da velocidade de corte e da profundidade de corte nas características de maquinagem como as forças de corte, a rugosidade e a potência dispendida. Com este modelo conseguiram verificar que as forças de corte aumentam com o aumento da profundidade de corte, porém a força de corte diminui com o aumento da velocidade de corte. Por sua vez, a rugosidade diminui com profundidades de corte baixas e com velocidades de corte mais elevadas. A potência necessária para o processo de microtorneamento aumenta com o aumento da velocidade e da profundidade de corte.

Piotrowska et al. (2009) investigaram as forças de corte que ocorrem durante o processo de microtorneamento, utilizando um modelo matemático bidimensional que caracteriza o deslocamento entre o comando e a posição real da ponta da ferramenta. As coordenadas cartesianas (X,Y), no início do processo de torneamento, têm a origem centrada na posição da ferramenta. Posto isto, executaram o modelo para prever o avanço, a profundidade de corte, as forças e as deformações num processo de microtorneamento. As principais conclusões retiradas foram que a posição real da ferramenta é diferente da esperada, as forças de corte e de avanço conseguem ser determinadas pelo modelo e é possível calcular a área efectiva de corte. Os parâmetros que mais influenciam a rugosidade são a

profundidade de corte, o avanço e o material da peça a maquinar. Este modelo permite uma melhor compreensão da dinâmica do processo de microtorneamento.

## 2.4. Síntese

Na Tabela 2-1 podemos verificar os resultados obtidos em algumas das investigações anteriormente referidas, assim como os parâmetros e ferramentas utilizadas para os alcançar.

**Tabela 2-1: Parâmetros de corte e respectivos resultados, em termos de rugosidade de superfície e diâmetro mínimo**

Autor	Material	Ferramenta	Velocidade de corte [m/min]	Avanço [ $\mu\text{m}/\text{rev}$ ]	Profundidade de corte [ $\mu\text{m}$ ]	Diâmetro mínimo obtido [ $\mu\text{m}$ ]	Rugosidade obtida (Ra) [ $\mu\text{m}$ ]
Lu et al. (1999)	Aço	PCD	3,5	5	5	10	-
Sumio et al. (2002)	Latão C3604	-	23,6	-	0,195	100	0,03
Rahman et al. (2004)	Cobre, Aço, Alumínio, Aço inox	PCD	3,2	50	0,5	275	-
Liu et al. (2006)	Alumínio AL5083-H116	PCD	200	5	100	-	2,3
Asad et al. (2007)	Aço	PCD	-	-	-	100	-
Gaitonde et al. (2009)	Poliamida com 30% de fibra de vidro	PCD	200	10	-	-	0,75

O microtorneamento é um processo de maquinagem por arranque da apara relativamente novo, porém, é um processo muito promissor que tem estado cada

vez mais em foco na indústria. Os investigadores estão a dar muita importância a este tipo de micromaquinagem, dedicando as suas pesquisas a esta área para melhorar os processos de corte nos mais diversos materiais.

Os estudos levados a cabo pelos investigadores proporcionaram o aparecimento de materiais para as ferramentas de corte com melhores características e o surgimento de novas formas de posicionamento e movimento dos eixos.

É de salientar que Alting et al. (2006) comprovaram a utilidade de tentar efectuar microtorneamento de aço. Segundo Kim & Nam (1995) podem utilizar-se avanços inferiores a 12,5µm que, tendo em conta os estudos de Lu et al. (1999) e Asad et al. (2007), permite obter peças com diâmetros inferiores a 100µm.

## Capítulo 3

---

### **3. Metodologia experimental**

#### **3.1. Materiais utilizados**

No torneamento, tal como nos restantes processos de maquinagem, é necessário ter em conta o material a maquinar.

Neste trabalho de investigação os materiais utilizados foram o aço CK45 (norma DIN), também referido como aço 1045 (norma AISI), e o alumínio EN AW-2011 (norma BS), também referido como Al Cu6 BiPb (norma ISO).

##### **3.1.1. Aço AISI 1045**

O aço AISI 1045 é um aço utilizado geralmente em aplicações que exigem têmpera superficial (em óleo ou água) ou resistência mecânica superior ao 1020, sendo utilizado em peças mecânicas em geral.

Este aço é indicado para transmissões de média solicitação, parafusos, cabos, malas, eixos para vagões ferroviários, etc... É um aço de médio teor de carbono que pode ser endurecido com um tratamento térmico e pode ser tratado selectivamente por indução ou chama. Desse modo, encontra grande aplicação no fabrico de forjados, partes estruturais de máquinas e eixos em geral.

Na Tabela 3-1 encontram-se apresentadas algumas características químicas e propriedades mecânicas do aço AISI 1045.

**Tabela 3-1: Características químicas e propriedades do aço AISI 1045**

% de Carbono	% de Ferro	% de Magnésio	Tensão de Cedência	Resistência à tracção	Módulo de Young	Densidade
0,42-0,50	98,50–99,00	0,60-0,90	550 MPa	620 MPa	200 GPa	7,87 g/cm <sup>3</sup>

### 3.1.2. Alumínio BS EN AW-2011

O alumínio é o elemento metálico mais abundante da crosta terrestre. A sua leveza, condutividade eléctrica, resistência à corrosão e baixo ponto de fusão conferem-lhe uma multiplicidade de aplicações, especialmente nas soluções de engenharia aeronáutica. Entretanto, mesmo com o baixo custo para a sua reciclagem, o que aumenta sua vida útil e a estabilidade do seu valor, a elevada quantidade de energia necessária para a sua obtenção reduz o seu campo de aplicação, além das implicações ecológicas negativas dos subprodutos do processo de reciclagem, ou mesmo de produção do alumínio primário. O alumínio tem uma combinação única de propriedades mecânicas e químicas apresentadas na Tabela 3-2.

**Tabela 3-2: Características químicas e propriedades do Alumínio BS EN AW-2011**

% de Cobre	% de Ferro	% de Alumínio	Tensão de Cedência	Resistência à tracção	Módulo de Young	Densidade
5,0-6,0	Até 0,7	93,7	262 MPa	310-420 MPa	72,5 GPa	2,84 g/cm <sup>3</sup>

### 3.2. Ferramentas

As ferramentas e porta-ferramentas de maquinagem são dos factores mais importantes para se conseguir obter peças de reduzidas dimensões com uma boa qualidade de superfície e precisão dimensional. Actualmente, a gama de ferramentas disponível no mercado é muito grande, porém, para micromaquinagem a oferta é mais limitada.

Neste trabalho utilizaram-se ferramentas para tornos CNC convencionais de dimensão reduzida, apropriadas para o torneamento de peças pequenas.

A ferramenta utilizada preferencialmente para as operações de acabamento é uma ferramenta rômbica de  $55^\circ$ , DCMW – 11T302 SM10, que para ser utilizada é fixa ao porta-ferramenta SDJCL 2020K11, Figura 3-1.



Figura 3-1: Porta-ferramenta SDJCL 2020K11 com a sua ferramenta DCMW-11T302 SM10

A ferramenta utilizada no torneamento cilíndrico foi a TPUN 110304 H13E que é aplicada no porta-ferramenta CTGPL 2020 K11 apresentado na Figura 3-2.



Figura 3-2: Porta-ferramenta CTGPL 2020 K11 com a ferramenta TPUN 110304 H13E

Para efectuar uma possível operação de sangrar utilizou-se a ferramenta N151.2-540-40-3B (H13A) e o porta-ferramenta LF151.22 2020 40, representado na Figura 3-3, que permite uma profundidade de sangrar ( $a_r$ ) de 13,1mm.



Figura 3-3: Porta-ferramenta LF 151.22 2020 40 e sua ferramenta N151.2-540-40-3B

Os principais ângulos das ferramentas e porta-ferramentas encontram-se expostos na Tabela 3-3.

Tabela 3-3: Formato e ângulos das ferramentas e porta-ferramentas

Formato	Ângulo de ponta	Ângulo de folga	Ângulo de Posição ( $k_r$ )	Ângulo de Ataque ( $\gamma$ )	Ângulo de Inclinação ( $\tau_s$ )	Raio de ponta ( $r_e$ )
	55°	7°	93°	0°	0°	0,2
	60°	11°	91°	0°	0°	0,4
	88°	0°	92°	5°	0°	0,2



### 3.3. Torno CNC

O processo de torneamento é um dos processos tecnológicos mais utilizados, hoje em dia, para o fabrico de peças para as mais diversas áreas.

O torno utilizado no estudo efectuado foi o KMHP 50 da Kingsbury, Figura 3-4, que consegue atingir cerca de 4500 rpm, onde se pretende efectuar uma peça na escala micrométrica com a melhor qualidade superficial possível, avaliando também, a precisão e repetibilidade que o torno apresenta. Este é composto por uma torreta onde se fixam as ferramentas a utilizar e a bucha onde se colocam as peças a maquinar, Figura 3-5.



Figura 3-4: Torno KMHP 50 da Kingsbury utilizado

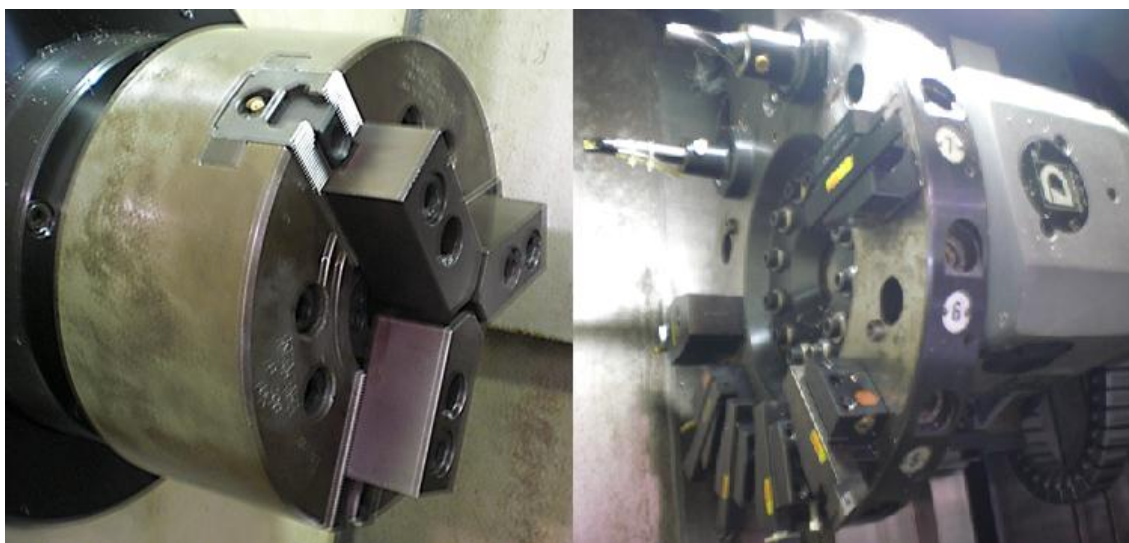


Figura 3-5: Bucha e torreta do torno KMHP 50

### 3.4. Parâmetros

Os parâmetros de maquinagem são muito importantes na obtenção de peças com boa qualidade, quer em termos de forma, dimensão, quer em termos da qualidade de superfície obtida.

Neste trabalho o objectivo é fazer peças de pequenas dimensões (micrométricas) e para isso o estudo dos parâmetros de corte é fundamental. A profundidade de corte, a velocidade de corte, o avanço e a lubrificação foram os parâmetros estudados.

#### 3.4.1. Velocidade de corte

Considerando que os diâmetros maquinados são inferiores a 3mm e que o torno deve trabalhar até às 3000rpm, devido a motivos de segurança e estabilidade dinâmica, o valor da velocidade de corte com o qual foi efectuado o estudo varia conforme demonstra a Figura 3-6.

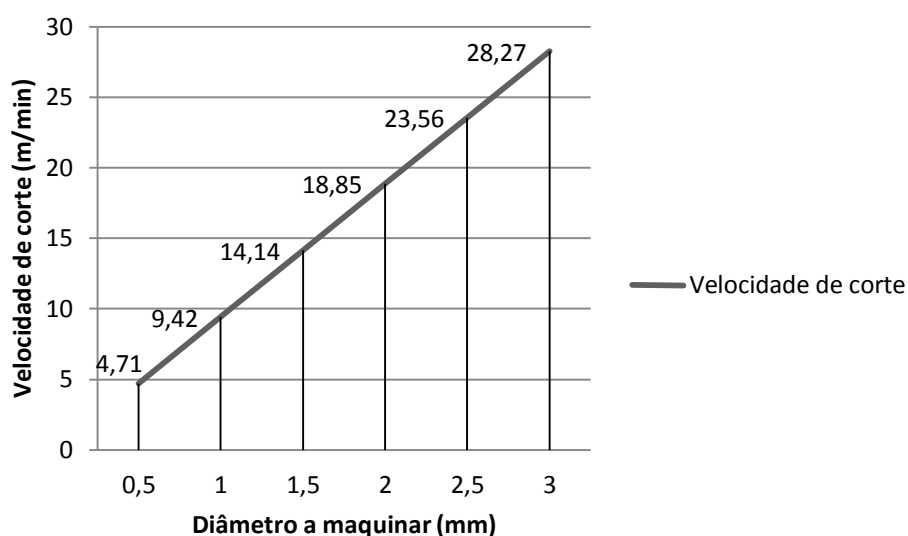


Figura 3-6: Velocidades de corte utilizadas nos testes

Inicialmente, o estudo para verificar quais os melhores parâmetros para tornear peças com dimensões reduzidas incidu em peças com 2mm de diâmetro, pelo que a sua velocidade de corte foi de 18,85m/min.

Numa fase posterior quando se tentou obter peças mais pequenas, a velocidade utilizada foi de 4,71m/min.

### 3.4.2. Avanço

O avanço é um dos factores mais importantes para a qualidade final da peça, tendo influência no acabamento da superfície e na precisão dimensional obtida.

Foram utilizados quatro valores de avanço, Tabela 3-4, que combinados com a profundidade de corte permitiram obter resultados distintos.

**Tabela 3-4: Avanços utilizados nos testes**

Avanço ( $\mu\text{m}/\text{rot}$ )			
100	50	25	12,5

### 3.4.3. Profundidade de corte

A profundidade de corte é um parâmetro que, tal com o avanço, condiciona a secção da aparta. Quanto maior for a profundidade de corte, maior a potência necessária para conseguir efectuar a operação pretendida.

Foram efectuados ensaios com três profundidades de corte distintas, apresentadas na Tabela 3-5.

**Tabela 3-5: Profundidades de corte utilizadas nos testes**

Profundidade de corte ( $\mu\text{m}$ )		
300	100	50

### 3.4.4. Estratégia de maquinagem

Devido ao diâmetro da peça a produzir ser inferior a 2mm, o corte paralelo ao eixo de rotação (Figura 3-7a)) não é o mais apropriado, ao contrário do que acontece no torneamento convencional. À medida que a máquina se vai aproximando do eixo a peça maquinada tende a curvar, porque o diâmetro é reduzido e o comprimento sem suporte da peça aumenta.

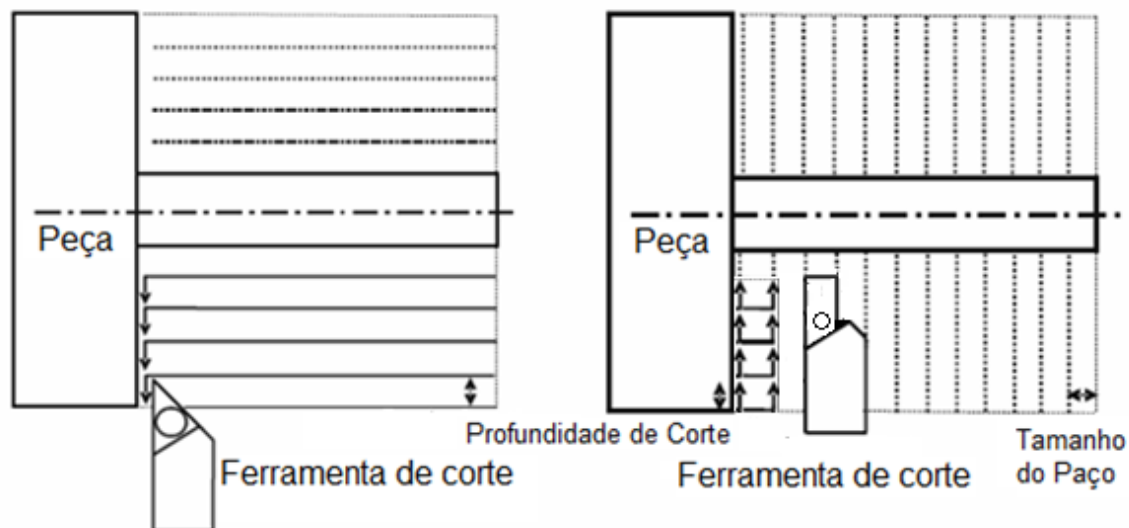


Figura 3-7: a) Corte longitudinal ao eixo

b) Corte transversal ao eixo

Uma outra maneira de maquinar a peça é de forma perpendicular ao eixo de rotação (Figura 3-7b)), tendo sempre apoio a cada passagem da ferramenta de corte, o que minimiza a deflexão do eixo. Neste caso a maquinagem iria ser em apenas um passo e não em vários como está representado na Figura 3-7b).

Tendo em conta estes factores, a escolha mais apropriada é a maquinagem transversal que apresenta um menor desvio, logo uma maior precisão dimensional. Porém, o aspecto do maquinado e a rugosidade que se conseguem obter são de menor qualidade do que com uma maquinagem por corte longitudinal, tendo-se optado por efectuar uma maquinagem longitudinal neste estudo.

### 3.4.5. Simulação numérica do microtorneamento

A simulação numérica por elementos finitos na maquinagem é actualmente utilizada para prever, de forma mais fácil e económica, o comportamento termo-mecânico do corte. A simulação numérica permite conhecer temperaturas, forças de corte, potências, entre outros factores.

Como tal, foram efectuadas simulações numéricas utilizando o software AdvantEdge® 5,4 para prever quais as temperaturas e forças de corte envolvidas no microtorneamento, tendo em conta os parâmetros de corte e materiais utilizados no presente estudo.

Este software foi concebido para simular operações de corte por arranque de apara em operações como furação, fresagem, torneamento, entre outros, tendo módulos de maquinagem a 2D e 3D. A interface é intuitiva, a introdução de parâmetros é simples e facilmente se consegue efectuar uma simulação numérica. A malha é gerada automaticamente, podendo o utilizador refinar a mesma se assim o entender. Tem também uma vasta lista de materiais já inseridos na base de dados.

A simulação numérica efectuada permitiu formular uma ideia relativamente às temperaturas atingidas e às forças envolvidas no processo.

Na Tabela 3-6 são expostos os significados das forças X e Y presentes na Figura 3-8 e na Figura 3-9.

**Tabela 3-6: Significado das forças**

Designação na Figura 3-8 e na Figura 3-9	Força correspondente numa operação de torneamento
Force-X (N)	Força de corte
Force-Y (N)	Força de avanço

Na Figura 3-8 a) podemos verificar que ao maquinar o aço AISI 1045 com uma profundidade de corte de 300 $\mu$ m e um avanço de 100 $\mu$ m/rot, a força máxima necessária é de cerca de 140N e a temperatura atinge cerca de 430°C. Comparando esses valores com a simulação presente na Figura 3-8 b), verificamos que as forças para a maquinagem com parâmetros mais pequenos (profundidade de corte de 50 $\mu$ m e avanço de 12,5 $\mu$ m/rot) é substancialmente menor, não sendo superior a 5N, e a temperatura atingida é sensivelmente metade da obtida na simulação com os parâmetros mais grosseiros, não superando os 220°C. Ao analisar a força de avanço (Force-Y na Figura 3-8) verificamos que esta é dez vezes superior com os parâmetros mais exigentes do que com os parâmetros mais ligeiros, tendo um valor máximo de aproximadamente 40N.

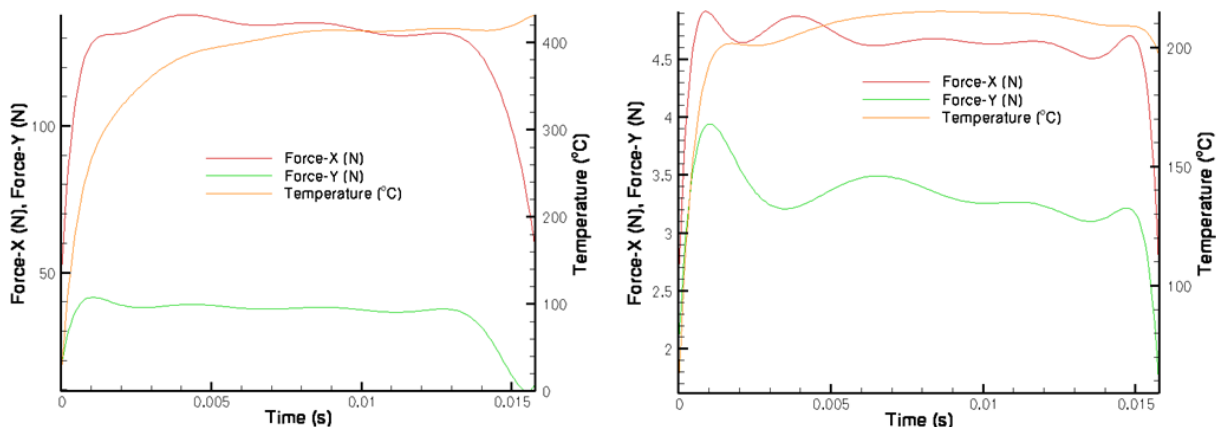


Figura 3-8: a)  $P=300\mu\text{m}$  e  $a=100\mu\text{m/rot}$  no aço

b)  $P=50\mu\text{m}$  e  $a=12,5\mu\text{m/rot}$  no aço

Ao comparar os valores obtidos no aço (Figura 3-8 a)) e no alumínio, Figura 3-9, verifica-se que os valores do alumínio, para as mesmas condições de corte (profundidade de corte de  $300\mu\text{m}$  e avanço de  $100\mu\text{m/rot}$ ), são substancialmente menores. No alumínio são atingidos apenas 10N de força de corte, contra os 140N do aço, e  $48^\circ\text{C}$  de temperatura máxima, cerca de 12% da temperatura máxima atingida no aço.

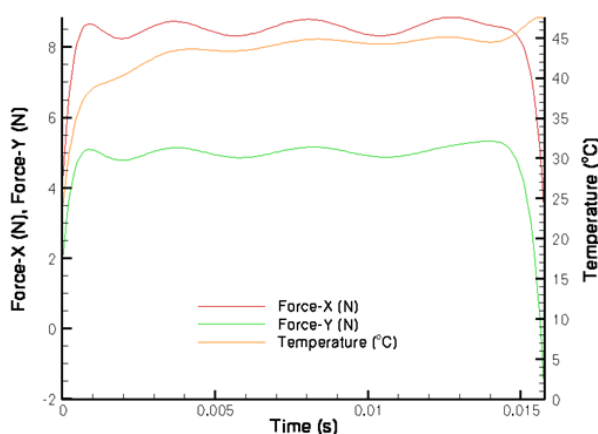


Figura 3-9:  $P=300\mu\text{m}$  e  $a=100\mu\text{m/rot}$  no alumínio

Analisando a força de avanço (Force-Y na Figura 3-9) verificamos que esta é muito superior no aço, onde atinge os 40N, do que no alumínio onde apenas atinge os 5,5N.

### 3.4.6. Índice de esbelteza

Todas as peças que são maquinadas têm de cumprir alguns requisitos para garantir as dimensões e as formas desejadas. Para se poderem efectuar peças de

dimensões muito reduzidas é necessário estudar o seu índice de esbelteza para verificar qual a dimensão máxima possível de maquinar. Se uma peça for demasiado comprida para um determinado diâmetro pode apresentar conicidade, outro defeito de forma ou em último caso fracturar.

Na Figura 3-10 está representada a relação aconselhada entre o comprimento ( $l$ ) e o diâmetro ( $d$ ) de peças pequenas de  $l = 5d \Leftrightarrow \frac{l}{d} = 5$ , (Ferraresi, 1977).

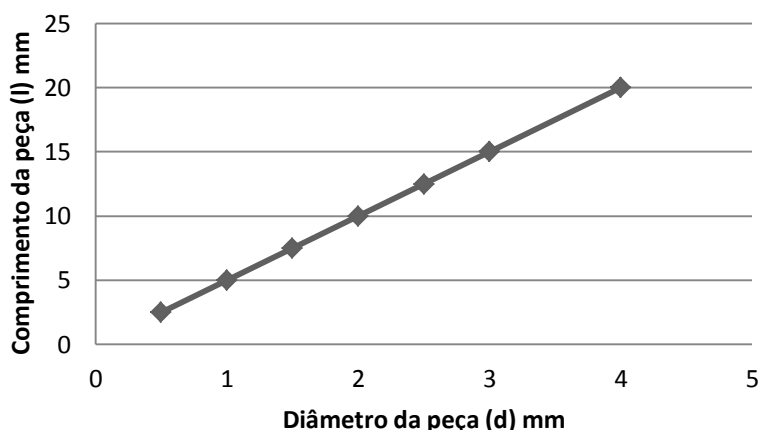


Figura 3-10: Relação  $l/d$

Para o estudo inicial a efectuar, em que o diâmetro a maquinar é de 2mm, verifica-se que o comprimento máximo do cilindro não deve superar os 10mm. Na etapa de miniaturização o comprimento máximo da peça não deve ser superior a 3mm para um diâmetro de 0,6mm.

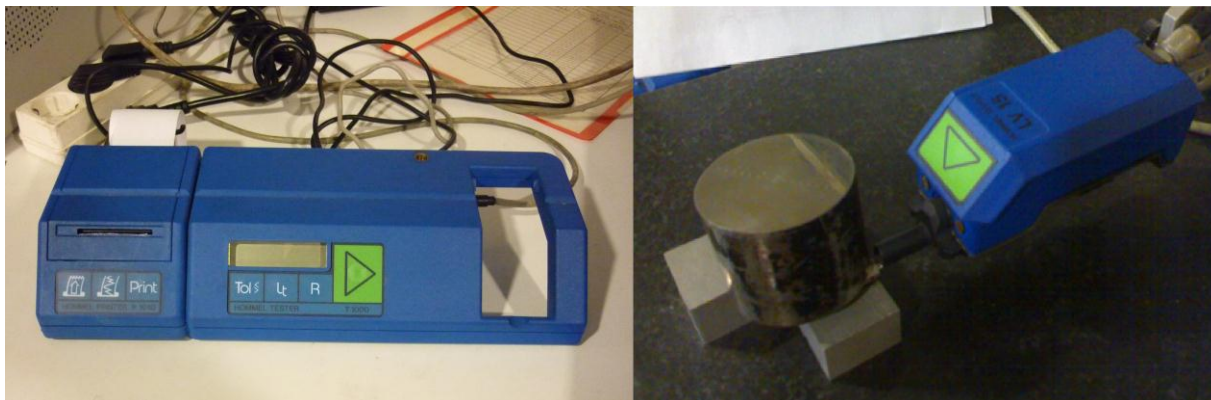
### 3.5. Métodos de caracterização de superfície

#### 3.5.1. Rugosímetro

O rugosímetro utilizado para a caracterização geométrica das superfícies foi o Hommel Tester T1000 E, Figura 3-11, que utiliza um software designado Turbo Datawin. As principais características do rugosímetro são:

- Mais de 10 parâmetros de avaliação de acordo com as normas de Rugosidade DIN/ISO/JIS/SEP1940.
- As medições quando não executadas correctamente são excluídas e informadas claramente no display;
- Menu de controlo e exibição gráfica de resultados no ecrã do computador.

- Resolução máxima:  $0,01\mu\text{m}$
- Campo de medição:  $\pm 80\mu\text{m}$
- Cut-off (LC): 0,25 e 0,8 mm
- Categoria de precisão: Categoria 1, conforme DIN 4772
- Impressora integrada.



**Figura 3-11: Rugosímetro Hommel Tester T1000 E**

As principais rugosidades que foram tidas em conta no trabalho desenvolvido foram as apresentadas na Tabela 3-7.

**Tabela 3-7: Rugosidades e seu significado**

Designação	Significado
Ra	Rugosidade média aritmética
RzD	Profundidade média da rugosidade norma DIN 4768
RzI	Profundidade média da rugosidade norma ISO 468
RmD	Rugosidade média norma DIN
Rt	Amplitude da rugosidade (do pico mais alto ao vale mais baixo)
Rp	Profundidade máxima de aplainamento
Rpm	Profundidade média de aplainamento
Rq	Rugosidade média geométrica
R3z	Rugosidade média do 3º pico ao 3º vale (despreza os 2 picos mais altos e os 2 vales mais baixos)
Pt	Amplitude de perfil
Pc	Picos existentes por cada centímetro
Sm	Passo médio da rugosidade

As rugosidades que dizem respeito à amplitude são o Ra, RzD, RzI, RmD, Rt, Rp, Rpm, Rq e o R3z, e as rugosidades Pt, Pc e Sm dizem respeito ao espaçamento da peça produzida.



A medição da rugosidade de cada peça produzida foi efectuada em três pontos distintos separados cerca de  $120^\circ$ , como se pode observar na Figura 3-12.

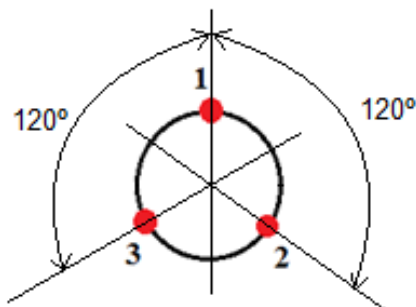


Figura 3-12: Pontos de medição da rugosidade

### 3.5.2. Microscópio de oficina

Nesta investigação foi utilizado um microscópio de oficina da Mitutoyo TM com uma ampliação de 30X e dois pratos micrométricos (Figura 3-13), para medir e avaliar a qualidade de superfície das peças obtidas e a precisão dimensional.

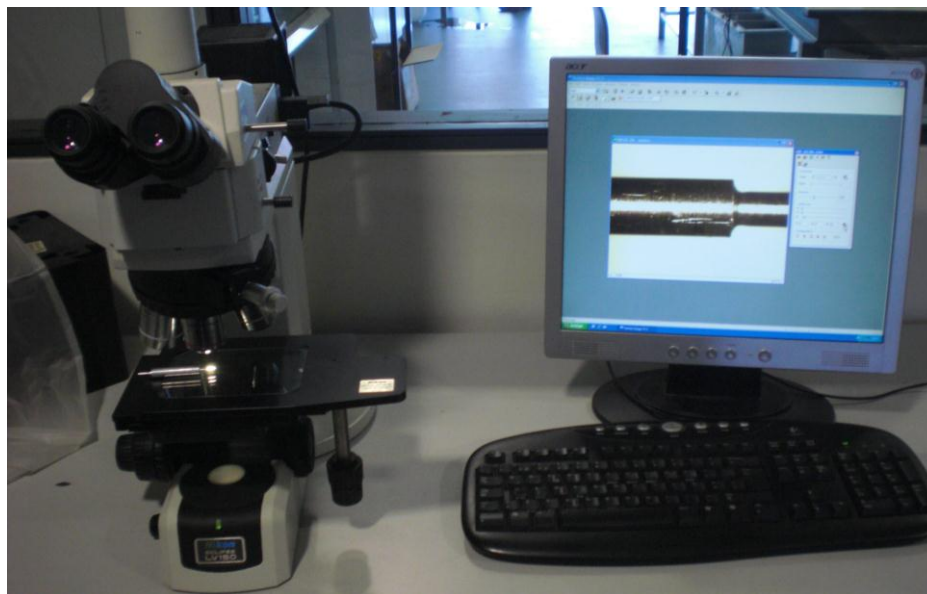


Figura 3-13: Microscópio de oficina Mitutoyo TM

### 3.5.3. Microscópio óptico

Outro microscópio utilizado foi o microscópio óptico Nikon Eclipse Lv 150, com ampliação máxima de 1000X, apresentado na Figura 3-14, que permitiu avaliar as dimensões das peças através de um sistema de análise de imagem no computador,

que utiliza uma câmara vídeo tendo em conta a ampliação existente na altura da captura da foto.



**Figura 3-14: Microscópio óptico Nikon Eclipse LV150**

Este microscópio também foi utilizado para captar e guardar fotografias da superfície das peças torneadas.

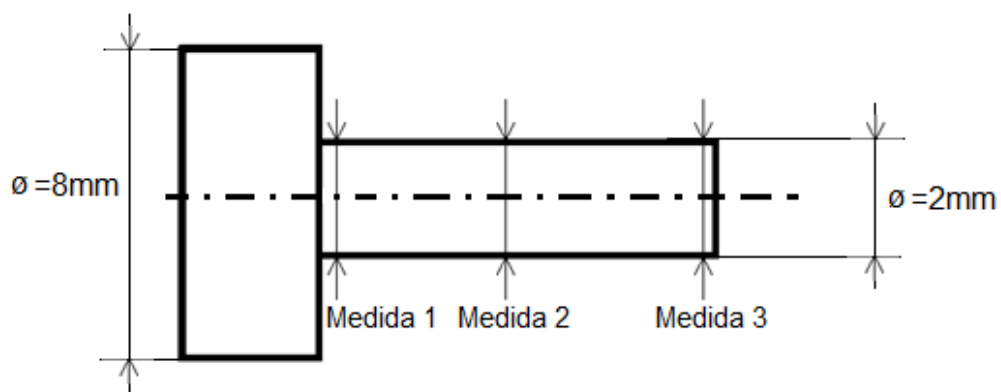
#### **3.5.4. Micrómetro digital**

Outro dos instrumentos de medida utilizados foi o micrómetro digital Mitutoyo MDC-25SB, apresentado na Figura 3-15, que tem uma resolução de 1  $\mu\text{m}$ .



**Figura 3-15: Micrómetro Mitutoyo MDC-25SB**

Para verificar a existência de conicidade nas peças maquinadas foram efectuadas três medições em locais distintos representados na Figura 3-16.



**Figura 3-16: Local das medidas efectuadas em cada peça**

A medida 1 foi efectuada na base da peça, a medida 2 no centro da peça e a medida 3 no topo da mesma.



## Capítulo 4

---

### **4. Resultados obtidos e sua discussão**

Ao longo do estudo efectuado foram obtidos resultados que são analisados e discutidos neste capítulo. A sequência de trabalho e análise de resultados levada a cabo encontra-se representada na Figura 4-1.

Inicialmente foram estudados os parâmetros de maquinagem, nomeadamente o avanço e a profundidade de corte, com vista à sua optimização. De seguida foi efectuado um estudo onde se pretendeu verificar qual a melhor geometria das ferramentas, de entre as geometrias disponíveis. Posteriormente verificou-se se é ou não vantajoso utilizar lubrificação. Por fim, procedeu-se à miniaturização máxima possível de um cilindro regular, sendo efectuados ensaios com geometrias mais complexas.

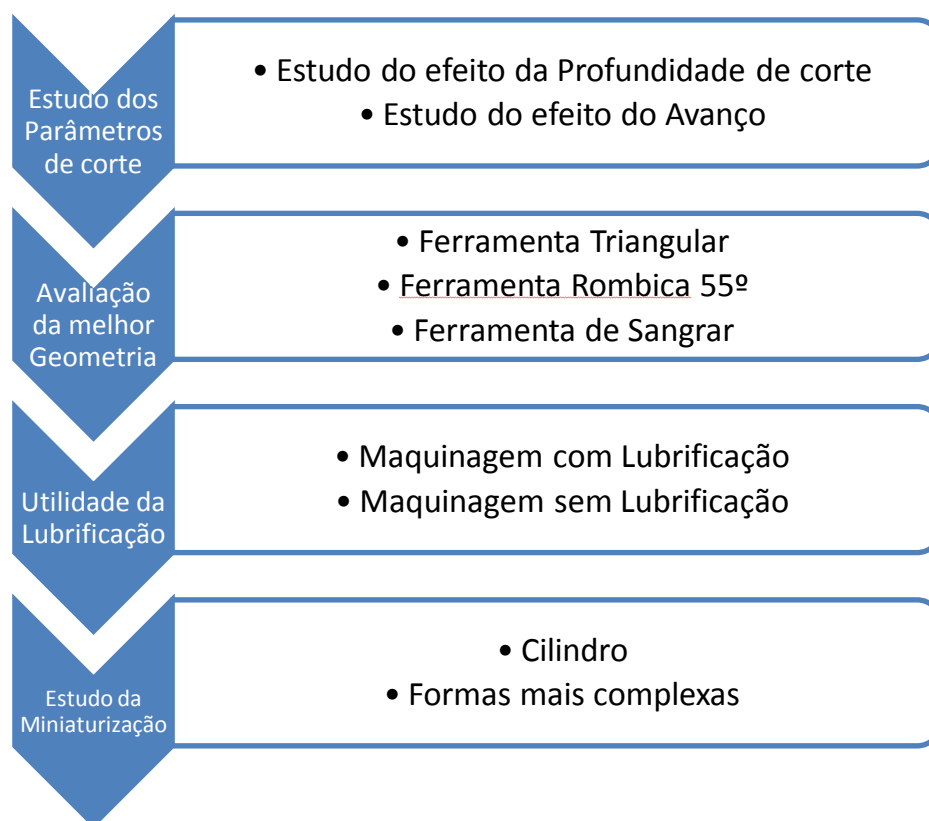


Figura 4-1: Plano de trabalho e análise de resultados

## 4.1. Avaliação dos parâmetros

### 4.1.1. Microtorneamento do aço AISI 1045

#### 4.1.1.1. Rugosidade média aritmética (Ra)

Na Figura 4-2 está representada a variação dos valores da rugosidade média aritmética (Ra) em função do avanço, para diferentes profundidades de corte (p). As peças foram todas produzidas com a ferramenta rômica 55°.

Verifica-se que a profundidade de corte não tem tanta influência no valor da rugosidade média aritmética como o avanço.

Os valores de Ra obtidos com um avanço de 100µm/rot são consideravelmente mais elevados do que os obtidos com outros avanços menores, que obtiveram valores de Ra muito próximos, sendo os melhores obtidos com avanços de 12,5µm/rot e 25µm/rot.

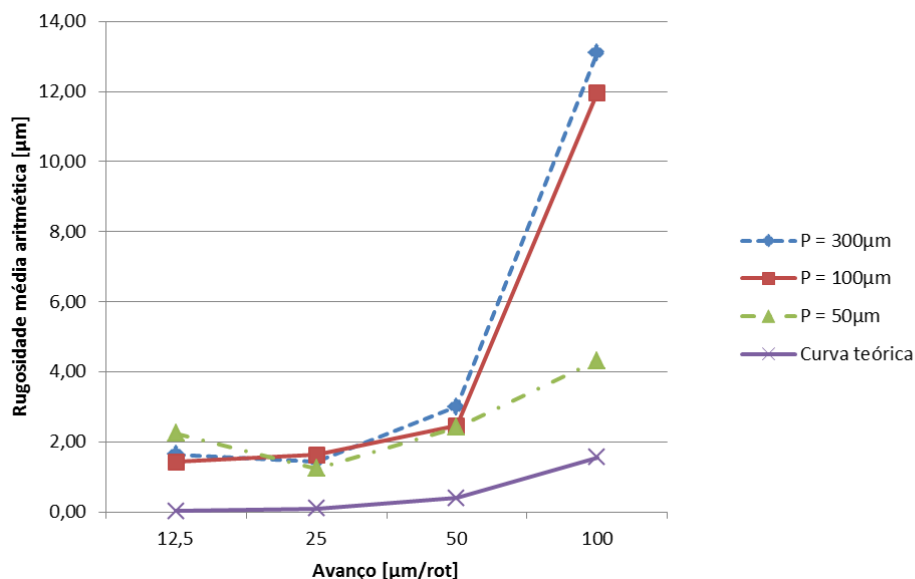


Figura 4-2: Rugosidade média aritmética do aço em função do avanço e da profundidade de corte.

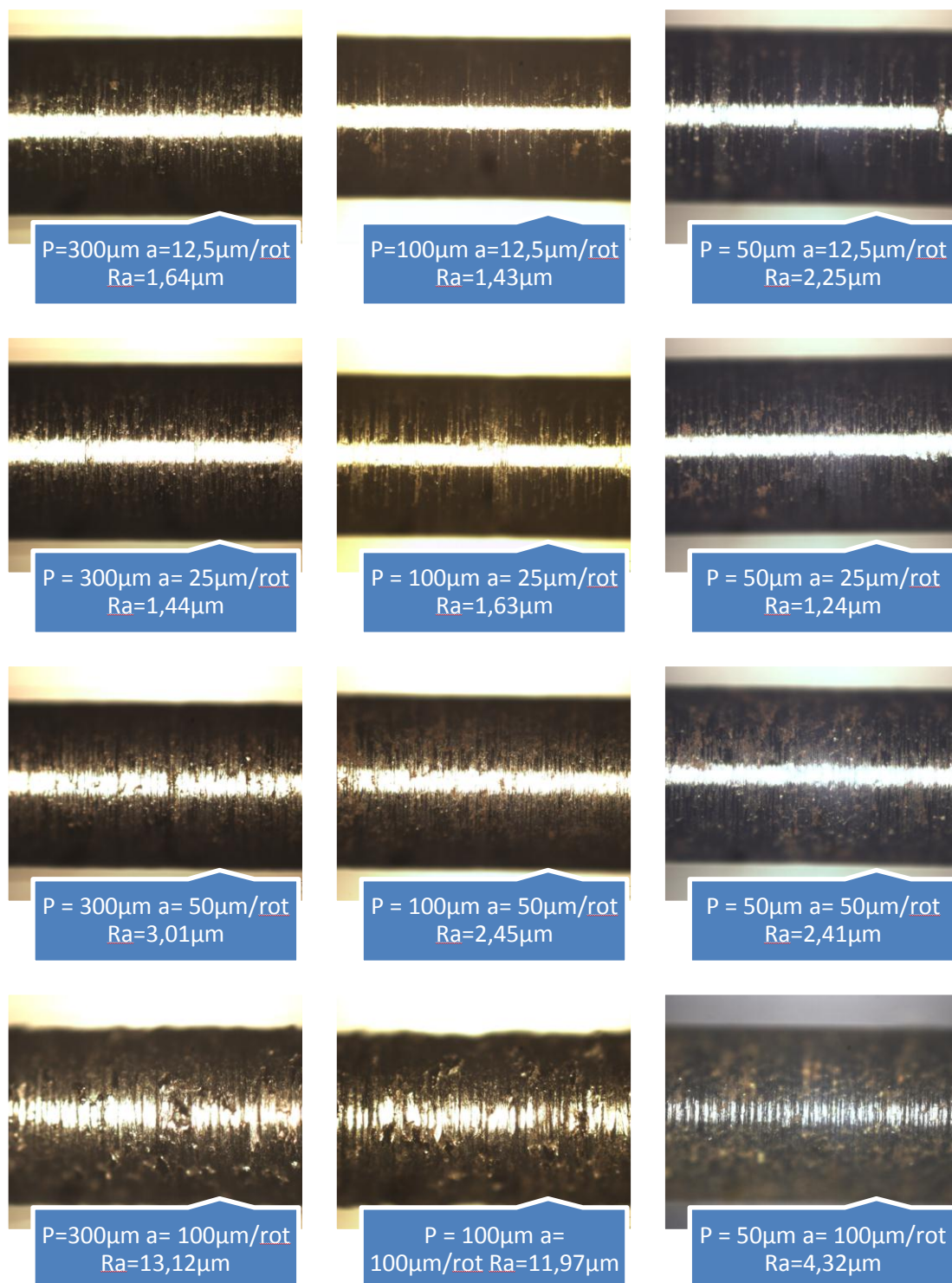
Ao comparar as curvas obtidas com a curva teórica, obtida partindo da equação (4-1) onde  $a$  é o avanço e  $r$  é o raio da ponta da ferramenta (0,2), verifica-se que todas elas se encontram com valores mais elevados e têm um comportamento semelhante.

$$R_{at} = \frac{a^2}{32r} \times 1000 \quad (4-1)$$

O aspecto da superfície também demonstra que para os avanços mais reduzidos a qualidade das peças é melhor. Como se pode observar na Figura 4-3, em que  $P$  é a profundidade de corte,  $a$  o avanço e  $R_a$  o valor da rugosidade média aritmética, para avanços de 12,5μm/rot e 25μm/rot, a superfície apresenta menos defeitos para qualquer profundidade de corte utilizada.

Estes resultados mostram que tendo em conta apenas o valor de  $R_a$ , para a maquinagem do aço, o avanço tem uma maior importância na qualidade de superfície obtida do que a profundidade de corte, valores esses que se encontram apresentados na Tabela 4-1.

Os melhores valores de  $R_a$  foram obtidos com avanços de 12,5 μm/rot e 25 μm/rot, o que demonstra que se devem utilizar preferencialmente estes avanços para operações de microtorneamento do aço.



**Figura 4-3: Aspecto superficial das peças torneadas em aço AISI 1045**

Na Tabela 4-1 verificamos que os melhores valores da rugosidade média aritmética obtidos são muito semelhantes, como é o caso do segundo e do terceiro melhores resultados (assim como o quarto e quinto) que apenas obtiveram uma diferença de rugosidades de 0,01μm.



Tabela 4-1: Melhores parâmetros e respectivos valores de Ra obtidos no aço AISI 1045

Ranking	Profundidade de corte [μm]	Avanço [μm/rot]	Valor de Ra [μm]
1º	50	25	1,24
2º	100	12,5	1,43
3º	300	25	1,44
4º	100	25	1,63
5º	300	12,5	1,64
6º	50	12,5	2,25

Os melhores resultados foram obtidos com profundidades de corte diferentes, não existindo uma com resultados claramente melhores que as restantes.

#### 4.1.1.2. Outros parâmetros de Rugosidade

Na Tabela 4-2 podem ser observados todos os parâmetros de rugosidade medidos em cada peça. Os valores de cada coluna foram obtidos pela média de três medidas de rugosidade efectuadas. Pode salientar-se que para cada profundidade de corte os melhores valores das rugosidades foram atingidos com os avanços de 12,5μm/rot e 25μm/rot, valores esses que estão destacados na Tabela 4-2.

Tabela 4-2: Valores de todas as rugosidades medidas no aço em μm

Profundidade de corte= 300 μm (P=300 μm)					P= 100 μm				P= 50 μm			
Avanço (μm/ rot)	12,5	25	50	100	12,5	25	50	100	12,5	25	50	100
Ra	1,64	1,44	3,01	13,12	1,43	1,63	2,45	11,97	2,25	1,24	2,41	4,32
RzD	10,91	9,43	18,37	66,34	8,73	10,68	16,12	51,35	14,19	8,94	15,76	23,83
RzI	12,25	10,15	20,59	72,64	10,73	12,44	18,68	57,65	15,31	10,29	17,27	25,55
RmD	12,80	12,05	21,38	77,68	11,52	14,10	19,57	62,69	16,10	11,08	18,23	27,69
Rt	14,15	13,49	22,48	82,41	12,59	14,75	21,21	67,42	18,05	11,28	20,34	29,19
Rp	6,07	5,91	9,62	45,81	4,96	5,60	8,87	30,82	7,99	4,57	9,79	13,50
Rpm	4,44	4,02	7,64	38,85	3,56	4,06	7,21	23,86	6,07	3,75	7,38	11,91
Rq	2,11	1,83	3,91	27,57	1,86	2,15	3,17	12,58	2,90	1,65	3,13	5,36
R3z	7,14	6,84	11,43	40,17	4,97	5,88	10,32	25,18	8,03	6,00	9,50	15,54
Pt	18,43	17,14	25,93	99,29	18,66	15,93	23,54	84,30	20,89	12,51	22,72	34,31
Pc	86	114	108	78	41	57	102	63	79	139	108	118
Sm	268,8	195,5	207,8	367,5	555,1	404,9	161,6	352,6	294,0	163,3	210,4	190,4

#### 4.1.1.3. Análise de forma

A forma da peça produzida é outro factor muito importante na avaliação da qualidade da peça obtida pelo que o seu estudo é fundamental.

No torneamento de peças com dimensões reduzidas a peça final corre o risco de sofrer conicidade e as suas dimensões podem não ser as pretendidas. Na Figura 4-4 podemos verificar que a cota da conicidade obtida pode ser por excesso ou defeito. Também se podem observar os locais onde foi medido o diâmetro da base e o diâmetro do topo da peça, como referido anteriormente.

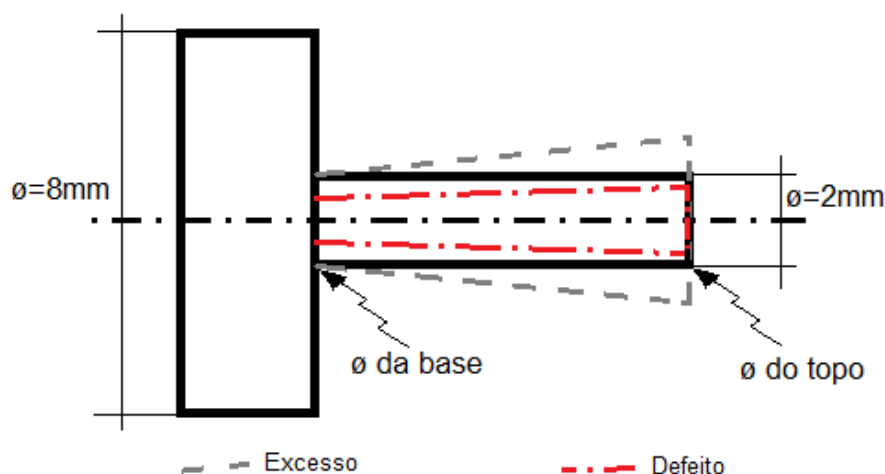


Figura 4-4: Conicidade com cota por excesso e por defeito

Na Figura 4-5 podemos observar a variação da medida do diâmetro tendo em conta a posição de medição ser na base, no meio ou no topo da peça (Figura 3-12) para cada profundidade de corte com diferentes avanços, onde se verifica a existência de conicidade em todas as peças produzidas.

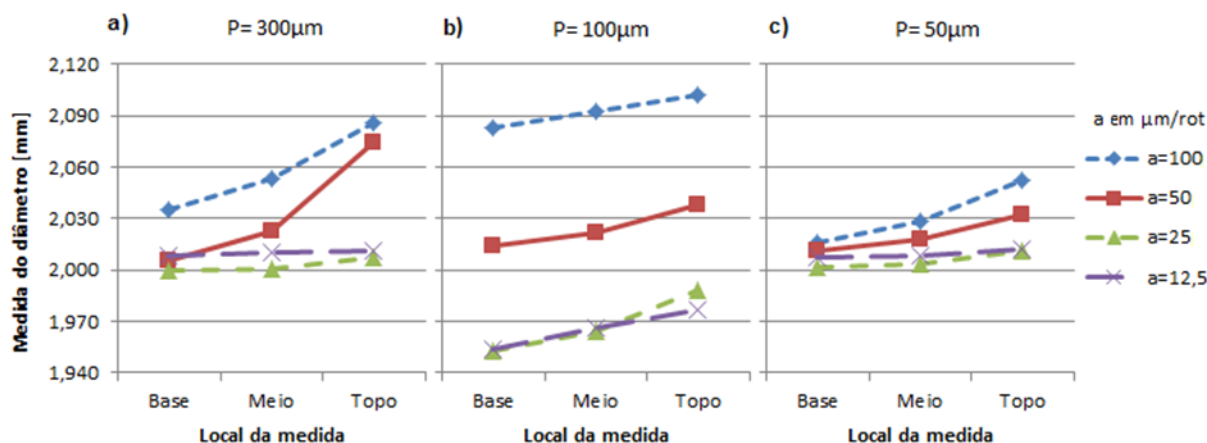


Figura 4-5: Medidas das peças em aço maquinadas com profundidade de corte de a) 300µm, b) 100µm e c) 50µm para os diferentes avanços

Independentemente da profundidade de corte utilizada, para avanços de 100µm/rot (Figura 4-5 b)) e 50µm/rot (Figura 4-5 c)) verifica-se a existência de conicidade sendo a sua cota por excesso, sendo os diâmetros obtidos distantes do valor pretendido (2mm).

Com os avanços de 25µm/rot e 12,5µm/rot verifica-se que as peças maquinadas com P=300µm (Figura 4-5 a)) e P=50µm (Figura 4-5 c)) obtiveram uma conicidade baixa com os valores do diâmetro muito próximos dos pretendidos (2mm). Para peças maquinadas com P=100µm (Figura 4-5 b)) verifica-se a existência de uma conicidade cuja cota é por defeito.

Os valores medidos que deram origem à Figura 4-5 estão apresentados na tabela A 1 em Anexo.

Para determinar quais as melhores soluções em termos geométricos foi criada a equação (4-2) que fornece o valor do ângulo  $\beta$  em função do comprimento da peça (l) e da diferença de diâmetros medida ( $\Delta d/2$ ), Figura 4-6. Na equação (4-2) o diâmetro obtido na base da peça está representado por  $d_b$  e o diâmetro obtido no topo da peça está representado por  $d_t$ , sendo o comprimento da peça (l) de 10mm para todas as peças.

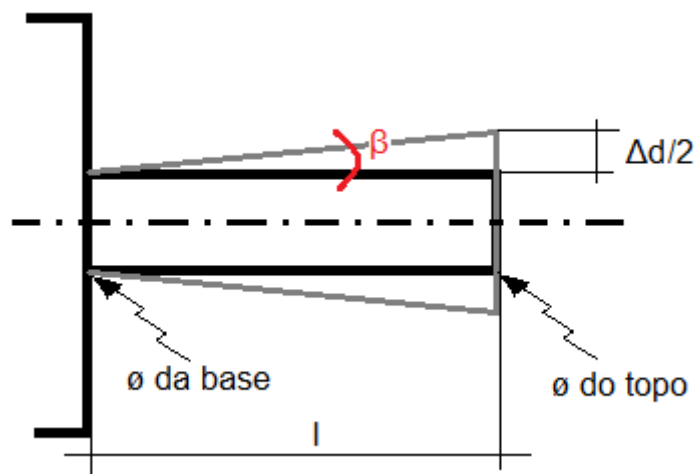


Figura 4-6: Representação do ângulo  $\beta$  calculado tendo em conta  $\Delta d$  e l

$$\beta = \tan^{-1} \left( \frac{\Delta d}{2l} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{d_t - d_b}{2l} \right) \quad (4-2)$$

Da equação obtiveram-se os valores apresentados na Tabela 4-3. Quanto menor o valor do ângulo  $\beta$  mais regular é a forma da peça.

Os valores destacados são os que apresentam os melhores resultados. Notar que não são os obtidos na avaliação tendo em conta apenas Ra.

Tabela 4-3: Valores da função de avaliação de forma das peças em aço AISI 1045

Profundidade de corte [μm]	Avanço [μm/rot]	Valor de $\Delta d$	Valor de $\beta$ [°]
300	100	0,051	0,146
	50	0,069	0,198
	25	0,007	0,020
	12,5	0,003	0,009
100	100	0,019	0,055
	50	0,024	0,069
	25	0,035	0,101
	12,5	0,023	0,066
50	100	0,036	0,103
	50	0,021	0,060
	25	0,009	0,026
	12,5	0,005	0,015

Da análise da Tabela 4-4, onde estão apresentados os melhores resultados obtidos tendo em conta apenas Ra e apenas a forma.

As condições de corte para as quais se obtiveram melhores resultados, tendo em conta apenas Ra, foram de  $P = 50\mu\text{m}$  e de  $a = 25\mu\text{m/rot}$ , que em termos de forma foi a quarta melhor solução. No caso da melhor solução tendo em conta apenas a forma, o melhor valor foi obtido com  $P = 300\mu\text{m}$  e  $a = 12,5\mu\text{m/rot}$ , que foi apenas a quinta melhor solução tendo em conta apenas os valores de Ra. Assim, verifica-se a necessidade de efectuar uma avaliação que englobe todos os parâmetros de rugosidade medidos e a avaliação de forma para se poder chegar a uma solução mais correcta.

Tabela 4-4: Comparação entre os melhores resultados tendo em conta apenas Ra e tendo em conta apenas a forma no torneamento em aço

Ranking	Avaliação tendo em conta Ra			Avaliação tendo em conta a forma		
	Valor de Ra [μm]	Avanço [μm/rot]	Profundidade de corte [μm]	Valor de $\beta$ [°]	Avanço [μm/rot]	Profundidade de corte [μm]
1º	1,24	25	50	0,017	12,5	300
2º	1,43	12,5	100	0,029	12,5	50
3º	1,44	25	300	0,040	25	300
4º	1,63	25	100	0,052	25	50
5º	1,64	12,5	300	0,109	100	100
6º	2,25	12,5	50	0,120	50	50

De salientar que os parâmetros para os quais se obteve o segundo melhor valor de rugosidade  $R_a$  ( $P=100\mu\text{m}$  e  $a=12,5\mu\text{m/rot}$ ) são apenas o sétimo melhor resultado em termos de forma.

#### 4.1.2. Microtorneamento do alumínio BS EN AW-2011

##### 4.1.2.1. Rugosidade média aritmética ( $R_a$ )

Na análise da rugosidade média aritmética ( $R_a$ ) apresentada na Figura 4-7, verifica-se, assim como aconteceu no aço AISI 1045, que a profundidade de corte não é o parâmetro que mais influencia o valor de  $R_a$ , mas sim o avanço. As curvas dos valores obtidos possuem um comportamento parecido ao da curva teórica, apresentando valores mais elevados mas próximos dos teóricos.

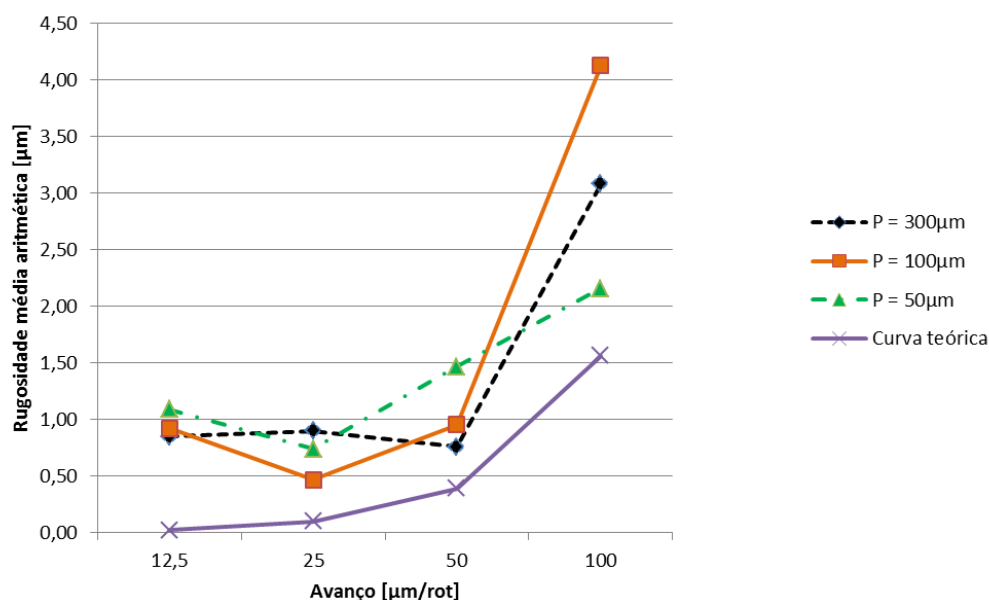


Figura 4-7: Rugosidade média aritmética do alumínio em função do avanço e da profundidade de corte

A análise da superfície, Figura 4-8, de cada peça demonstra que o acabamento é melhor para os avanços mais reduzidos ( $a= 12,5\mu\text{m/rot}$  e  $a= 25\mu\text{m/rot}$ ). Nos avanços de  $50\mu\text{m/rot}$  e  $100\mu\text{m/rot}$  são visíveis as várias passagens da ferramenta na peça, não tendo a superfície um aspecto regular e notando-se as marcas do avanço. De salientar que, apesar de serem visíveis as passagens da ferramenta na superfície da peça, no avanço de  $50\mu\text{m/rot}$  (em todas as profundidades de corte estudadas) os valores da rugosidade obtidos foram muito próximos dos valores obtidos com os avanços inferiores.

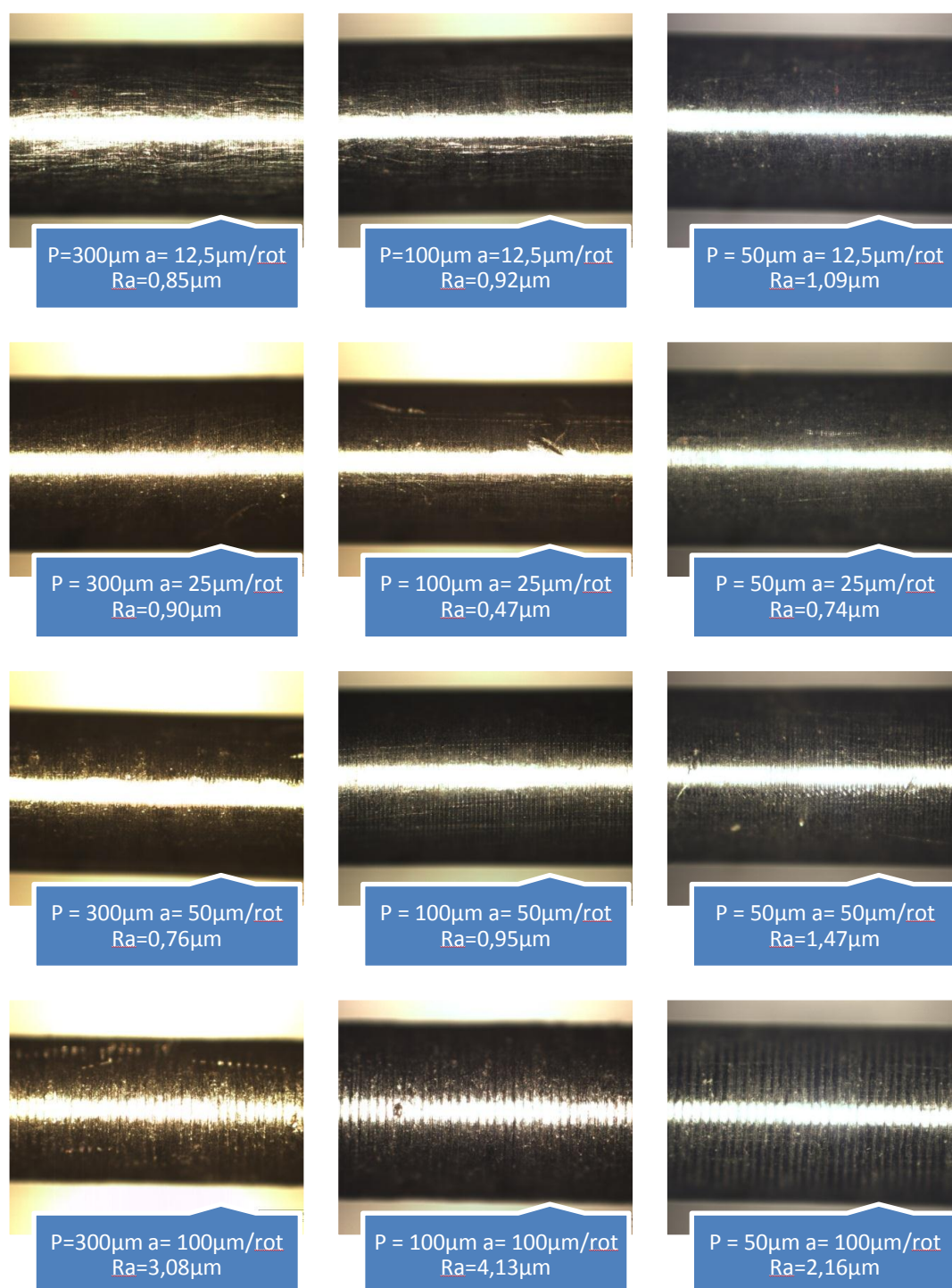


Figura 4-8: Aspecto superficial das peças em alumínio BS EN AW-2011

Os melhores resultados obtidos, analisando o valor de Ra, na maquinagem do alumínio estão apresentados na Tabela 4-5. Podemos verificar que foram os

avanços mais pequenos (12,5µm/rot e 25µm/rot) os que permitiram obter melhores resultados.

**Tabela 4-5: Melhores parâmetros e respectivos valores de Ra obtidos no alumínio BS EN AW-2011**

Ranking	Profundidade de corte [µm]	Avanço [µm/rot]	Valor de Ra [µm]
1º	100	25	0,47
2º	50	25	0,74
3º	300	50	0,76
4º	300	12,5	0,85
5º	300	25	0,90
6º	100	12,5	0,92

#### 4.1.2.2. Outros parâmetros de rugosidade

Os valores dos vários parâmetros de rugosidade medidos encontram-se apresentados na Tabela 4-6, valores esses que foram obtidos da média de três medidas de rugosidade efectuadas. Os valores apresentados foram obtidos com a ferramenta rômica 55º, e podemos verificar que os melhores valores foram quase sempre atingidos com os dois avanços mais baixos (12,5µm/rot e 25µm/rot).

**Tabela 4-6: Valores das rugosidades do alumínio maquinadas com ferramenta rômica 55º**

Profundidade de corte de 300 µm (P =300µm)					P =100µm				P =50µm			
Avanço (µm /rot)	12,5	25	50	100	12,5	25	50	100	12,5	25	50	100
Ra	0,85	0,90	0,76	3,08	0,92	0,47	0,95	4,13	1,09	0,74	1,47	2,16
RzD	4,55	5,53	4,28	16,08	5,30	2,84	5,66	22,37	4,94	4,60	8,65	12,36
RzI	5,34	6,67	5,04	20,95	5,86	3,32	6,20	25,64	5,31	5,09	10,21	12,94
RmD	5,90	7,18	4,70	23,94	6,23	3,68	6,30	27,64	5,50	5,55	10,09	16,85
Rt	6,36	7,62	5,49	24,74	6,46	4,04	6,73	29,96	5,89	5,63	11,60	17,13
Rp	3,32	3,48	2,80	14,80	3,01	1,85	3,40	15,85	2,72	2,64	4,93	10,68
Rpm	2,25	2,52	2,13	8,91	2,48	1,30	2,88	12,17	2,35	2,19	3,64	7,15
Rq	1,02	1,14	0,95	4,03	1,15	0,58	1,17	5,10	1,26	0,91	1,85	2,67
R3z	3,67	4,25	3,18	10,58	4,56	2,20	4,77	14,74	4,09	3,93	6,51	8,05
Pt	9,10	13,01	10,07	34,05	11,70	6,27	9,57	39,59	10,56	7,72	30,01	28,29
Pc	36	93	54	100	225	36	108	113	31	157	197	123
Sm	678,07	372,39	417,26	225,04	137,05	638,40	151,63	197,81	721,69	147,01	116,08	181,97

Os parâmetros que se encontram realçados são os dois melhores em cada profundidade de corte.

Os melhores valores em todos os parâmetros de rugosidade de amplitude foram obtidos com um avanço de 25 $\mu\text{m}/\text{rot}$  e uma profundidade de corte de 100 $\mu\text{m}$ .

#### 4.1.2.3. Avaliação da forma

Na verificação dimensional apurou-se que a tendência para a peça adquirir uma forma cônica é mais elevada do que no caso do aço, o que se deve ao facto de ser um material com um módulo de elasticidade inferior, acabando por resistir menos à força de maquinagem.

Na Figura 4-9 podemos observar a variação das medidas do diâmetro em função da posição de medição ser na base, no meio ou no topo da peça (Figura 3-12) para cada profundidade de corte com diferentes avanços.

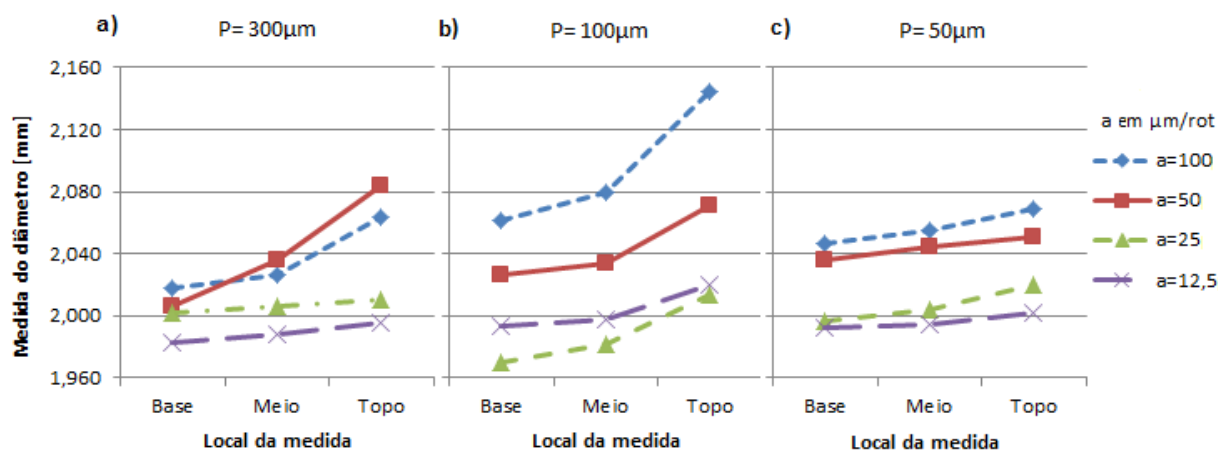


Figura 4-9: Medidas das peças em alumínio maquinadas com profundidade de corte de a) 300 $\mu\text{m}$ , b) 100 $\mu\text{m}$  e c) 50 $\mu\text{m}$  para os diferentes avanços

Verifica-se a existência de conicidade em todas as peças produzidas.

No alumínio, assim como aconteceu no aço, para avanços de 100 $\mu\text{m}/\text{rot}$  e 50 $\mu\text{m}/\text{rot}$  verifica-se a existência de conicidade, sendo a cota por excesso, obtendo-se diâmetros distantes do diâmetro pretendido (2mm), independentemente da profundidade de corte utilizada.

Com os avanços de 25 $\mu\text{m}/\text{rot}$  e 12,5 $\mu\text{m}/\text{rot}$  verifica-se que as peças obtidas têm uma conicidade inferior à obtida com os outros avanços, obtendo-se valores do diâmetro mais próximos do pretendido.

Nas peças maquinadas com P=300 $\mu\text{m}$  (Figura 4-9 a)) e P=50 $\mu\text{m}$  (Figura 4-9 c)) apenas as peças maquinadas com um avanço de 12,5 $\mu\text{m}/\text{rot}$  obtiveram uma



conicidade cujas cotas são por defeito. Nas peças maquinadas com  $P=100\mu\text{m}$  (Figura 4-9 b)), além da peça obtida com um avanço de  $12,5\mu\text{m/rot}$ , também a obtida com um avanço de  $25\mu\text{m/rot}$  obteve uma conicidade com cotas por defeito na base da peça e por excesso no topo.

Os valores medidos que deram origem à Figura 4-9 estão apresentados na tabela A 1 em Anexo.

Utilizando a equação (4-2) obtiveram-se os valores do ângulo  $\beta$  apresentados na Tabela 4-7 onde se verifica que quatro dos seis melhores resultados foram obtidos com uma profundidade de corte de  $50\mu\text{m}$ , independentemente do avanço (estão destacados na Tabela 4-7).

**Tabela 4-7: Valores da função de avaliação de forma das peças em alumínio BS EN AW-2011**

Profundidade de corte [ $\mu\text{m}$ ]	Avanço [ $\mu\text{m/rot}$ ]	Valor de $\beta$ [ $^\circ$ ]
300	100	0,132
	50	0,223
	25	0,024
	12,5	0,035
100	100	0,238
	50	0,129
	25	0,126
	12,5	0,077
50	100	0,063
	50	0,043
	25	0,076
	12,5	0,029

Ao analisar a Tabela 4-8 verificamos que, tal como aconteceu no aço, os parâmetros para os quais se obtiveram os melhores valores em termos da rugosidade média aritmética ( $R_a$ ) não são os mesmos que os obtidos em termos da avaliação da forma da peça. O melhor valor de  $R_a$  foi obtido com uma profundidade de corte de  $100\mu\text{m}$  e um avanço de  $25\mu\text{m/rot}$ , que em termos de avaliação de forma obteve apenas o oitavo melhor resultado. O terceiro melhor resultado em termos de  $R_a$ , com  $P=300\mu\text{m}$  e  $a=50\mu\text{m/rot}$ , apresenta um dos piores resultados em termos de avaliação de forma. Se tivermos em conta os parâmetros que obtiveram o melhor

resultado em termos de forma,  $P=300\mu\text{m}$  e  $a=25\mu\text{m/rot}$ , verificamos que em termos de  $R_a$  apenas obtive o quinto melhor valor.

Para se encontrarem os melhores parâmetros a utilizar é necessário efectuar um estudo que englobe os vários parâmetros de rugosidade e que tenha em conta também a forma da peça.

**Tabela 4-8: Comparação entre os melhores resultados obtidos tendo em conta apenas  $R_a$  e tendo em conta apenas a forma no torneamento em alumínio**

Ranking	Avaliação tendo em conta $R_a$			Avaliação tendo em conta a forma		
	Valor de $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	Avanço [ $\mu\text{m/rot}$ ]	Profundidade de corte [ $\mu\text{m}$ ]	Valor de $\beta$ [ $^\circ$ ]	Avanço [ $\mu\text{m/rot}$ ]	Profundidade de corte [ $\mu\text{m}$ ]
1º	0,47	25	100	0,023	25	300
2º	0,74	25	50	0,029	12,5	50
3º	0,76	50	300	0,035	12,5	300
4º	0,85	12,5	300	0,043	50	50
5º	0,90	25	300	0,063	100	50
6º	0,92	12,5	100	0,076	25	50

Uma avaliação tendo em conta apenas  $R_a$  ou a apenas a forma não é conclusiva nem exacta.

#### 4.1.3. Optimização dos parâmetros de maquinagem

Para otimizar os resultados globais foi elaborada uma equação que considera todas as rugosidades medidas e a avaliação de forma obtida (valor do ângulo  $\beta$ ) obtendo-se a equação (4-3) na qual os coeficientes  $c_i$  (i de 1 a 13) são o peso da parcela directamente relacionada (Tabela 4-9).

$$f = c_1 \frac{R_a}{R_{a\max}} + c_2 \frac{R_{zD}}{R_{zD\max}} + c_3 \frac{R_{zI}}{R_{zI\max}} + c_4 \frac{R_{mD}}{R_{mD\max}} + c_5 \frac{R_t}{R_{t\max}} + c_6 \frac{R_p}{R_{p\max}} + c_7 \frac{R_{pm}}{R_{pm\max}} + c_8 \frac{R_q}{R_{q\max}} + c_9 \frac{R_{3z}}{R_{3z\max}} + c_{10} \frac{P_t}{P_{t\max}} + c_{11} \frac{P_c}{P_{c\max}} + c_{12} \frac{S_m}{S_{m\max}} + c_{13} \frac{\beta}{\beta_{\max}} \quad (4-3)$$

**Tabela 4-9: Valor das constantes**

Parâmetros	Constante	Valor atribuído
Forma	$C_{13}$	0,40
Espaçamento	$C_{10}, C_{11}, C_{12}$	0,05
Amplitude	$C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8, C_9$	0,05
	$\sum_{i=1}^{13} C_i$	1

Na equação (4-3) os divisores são os maiores valores obtidos para o respectivo parâmetro entre todas as medições efectuadas para cada material e os dividendos são os valores medidos para cada peça em concreto. Na Tabela 4-10 podemos observar os valores máximos de cada rugosidade, os valores da avaliação de forma ( $\beta$ ) e os valores da função (f) obtidos para cada peça (P é a profundidade de corte em  $\mu\text{m}$  e a é o avanço em  $\mu\text{m}/\text{rot}$  em que a peça foi maquinada).

O valor máximo que se pode obter da equação (4-3) é 1, correspondendo ao pior resultado possível. Na Tabela 4-10 estão realçados os quatro melhores resultados da função (f).

Tabela 4-10: Valores dos máximos de cada rugosidade, valor de  $\beta$  e da função (f)

Rugosidades	Valores Máximos [ $\mu\text{m}$ ]		Parâmetros P [ $\mu\text{m}$ ] a [ $\mu\text{m}/\text{rot}$ ]	Valor de $\beta$ [°]		Valor da Função (f)	
	Aço	Alumínio		Aço	Alumínio	Aço	Alumínio
Ra	13,67	4,38	P=300 a=100	0,146	0,132	0,846	0,594
RzD	66,34	23,59	P=300 a=50	0,198	0,223	0,571	0,492
RzI	72,64	27,75	P=300 a=25	0,020	0,024	0,159	0,182
RmD	77,68	31,87	P=300 a=12,5	0,009	0,035	0,139	0,195
Rt	82,41	35,26	P=100 a=100	0,054	0,238	0,521	0,863
Rp	45,81	24,49	P=100 a=50	0,069	0,129	0,292	0,347
Rpm	38,85	12,71	P=100 a=25	0,100	0,126	0,374	0,310
Rq	27,57	5,43	P=100 a=12,5	0,066	0,077	0,252	0,271
R3z	40,17	15,42	P=50 a=100	0,103	0,063	0,424	0,384
Pt	99,29	55,82	P=50 a=50	0,060	0,043	0,278	0,280
Pc	157,39	385,23	P=50 a=25	0,026	0,076	0,168	0,225
Sm	666,13	856,50	P=50 a=12,5	0,014	0,029	0,170	0,193

Comparando os resultados tendo em conta apenas a rugosidade média aritmética (Ra), a avaliação de forma ( $\beta$ ) e os resultados tendo em conta todas as rugosidades e a avaliação de forma (função f) verificamos que existem algumas diferenças que podem ser observadas na Tabela 4-11.

Analisando a Tabela 4-11 verificamos que os melhores parâmetros variam conforme o tipo de avaliação efectuada.

No caso do aço verifica-se que a melhor combinação de parâmetros (P=300 $\mu\text{m}$  e a=12,5 $\mu\text{m}/\text{rot}$ ) na avaliação dimensional ( $\beta$ ) e a melhor combinação de parâmetros na avaliação utilizando a função (f) coincidem, porém esses parâmetros não obtiveram nenhum dos quatro melhores resultados analisando apenas Ra. Por outro

lado, a combinação que obteve o melhor valor de  $R_a$  ( $P=50\mu\text{m}$  e  $a=25\mu\text{m/rot}$ ) obteve apenas a terceira melhor avaliação tendo em conta a função ( $f$ ) e o quarto melhor resultado tendo em conta apenas a forma (representada por  $\beta$  na Tabela 4-11).

**Tabela 4-11: Parâmetros das melhores peças obtidas tendo em conta apenas  $R_a$ , apenas  $\beta$  e a função ( $f$ )**

Parâmetros dos melhores resultados		Avaliação do aço AISI 1045			Avaliação do alumínio BS EN AW-2011		
		$R_a$	$\beta$	$f$	$R_a$	$\beta$	$f$
1º	Profundidade de corte [ $\mu\text{m}$ ]	50	300	300	100	300	300
	Avanço [ $\mu\text{m/rot}$ ]	25	12,5	12,5	25	25	25
2º	Profundidade de corte [ $\mu\text{m}$ ]	100	50	300	50	50	50
	Avanço [ $\mu\text{m/rot}$ ]	12,5	12,5	25	25	12,5	12,5
3º	Profundidade de corte [ $\mu\text{m}$ ]	300	300	50	300	300	300
	Avanço [ $\mu\text{m/rot}$ ]	25	25	25	50	12,5	12,5
4º	Profundidade de corte [ $\mu\text{m}$ ]	100	50	50	300	50	50
	Avanço [ $\mu\text{m/rot}$ ]	25	25	12,5	12,5	50	25

No alumínio, tal como no aço, verifica-se que a melhor combinação de parâmetros ( $P=300\mu\text{m}$  e  $a=25\mu\text{m/rot}$ ) é a mesma tendo em conta  $f$  e tendo em conta  $\beta$ , porém esses parâmetros não obtiveram nenhuma dos quatro melhores valores de rugosidade ( $R_a$ ). A combinação de parâmetros ( $P=100\mu\text{m}$  e  $a=25\mu\text{m/rot}$ ), que obteve os melhores resultados na avaliação tendo em conta apenas  $R_a$ , não obteve nenhum dos quatro melhores resultados nas outras avaliações efectuadas.

Da análise da Tabela 4-11 verifica-se que os melhores parâmetros para o aço e para o alumínio são diferentes.

Posto isto, verifica-se que ao avaliar a qualidade de uma peça produzida não se pode ter em conta apenas a rugosidade média aritmética nem apenas a forma, sendo necessário efectuar um estudo que englobe a análise da forma e todos os valores das rugosidades.

Verifica-se que os melhores parâmetros obtidos combinam a profundidade de corte mais elevada em estudo ( $300\mu\text{m}$ ) e os menores avanços em estudo ( $25$  e  $12,5\mu\text{m/rot}$ ).

## 4.2. Geometria da ferramenta

Efectuado o estudo para a determinação dos melhores parâmetros de maquinação com a pastilha rômbica de 55°, foi efectuado um estudo para verificar qual a geometria que melhores resultados obtém.

As geometrias estudadas foram as presentes na Figura 4-10, que foram utilizadas para fabricar peças com 2mm de diâmetro por 10mm de comprimento (como no estudo efectuado anteriormente).

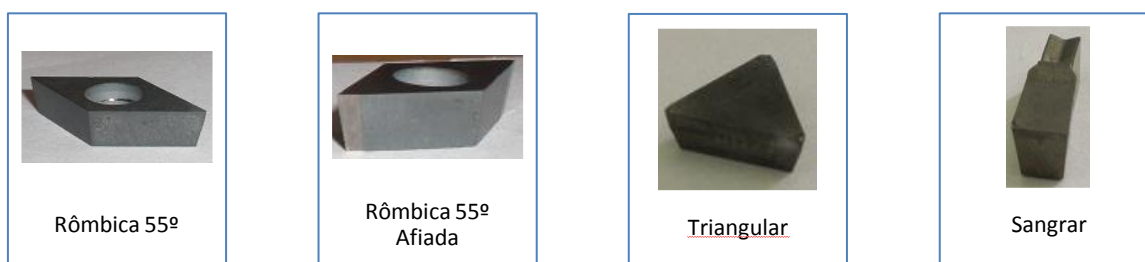


Figura 4-10: Geometrias em estudo

A combinação de parâmetros de corte escolhidos para efectuar os estudos de geometria e de lubrificação encontram-se apresentados na Tabela 4-12.

Tabela 4-12: Parâmetros escolhidos para o estudo da geometria e da lubrificação

Escolha	Profundidade de Corte [ $\mu\text{m}$ ]	Avanço [ $\mu\text{m}/\text{rot}$ ]
1	100	25
2	100	12,5
3	50	25

### 4.2.1. Microtorneamento do aço

#### 4.2.1.1. Rugosidade média aritmética (Ra)

Na Figura 4-11 podemos comparar os resultados da rugosidade média aritmética em função da profundidade de corte e avanço, para as diversas ferramentas utilizadas no microtorneamento do aço.

No caso do aço, verificou-se que a melhor peça foi obtida com a ferramenta de sangrar, com uma profundidade de corte de 50 $\mu\text{m}$  e um avanço de 25 $\mu\text{m}/\text{rot}$ , sendo o valor de  $R_a$  de 0,48 $\mu\text{m}$ .

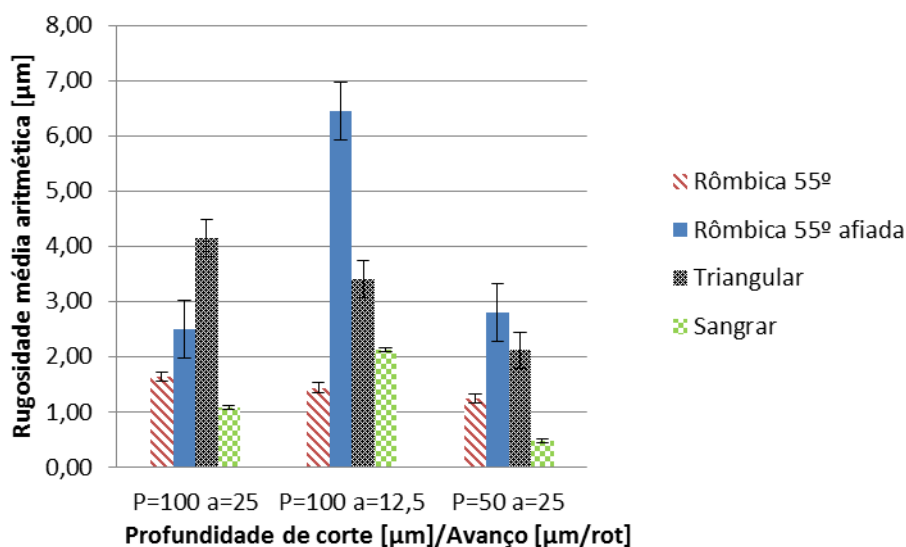


Figura 4-11: Comparação de  $R_a$  tendo em conta a profundidade de corte e o avanço no aço para as diferentes ferramentas

Para o aço a ferramenta rômbica 55° afiada e a ferramenta triangular obtiveram piores resultados que a ferramenta rômbica 55° e não são recomendáveis para efectuar operações de acabamento no microtorneamento do aço.

Os valores de todas as rugosidades medidas estão apresentados na tabela A 2 em anexo.

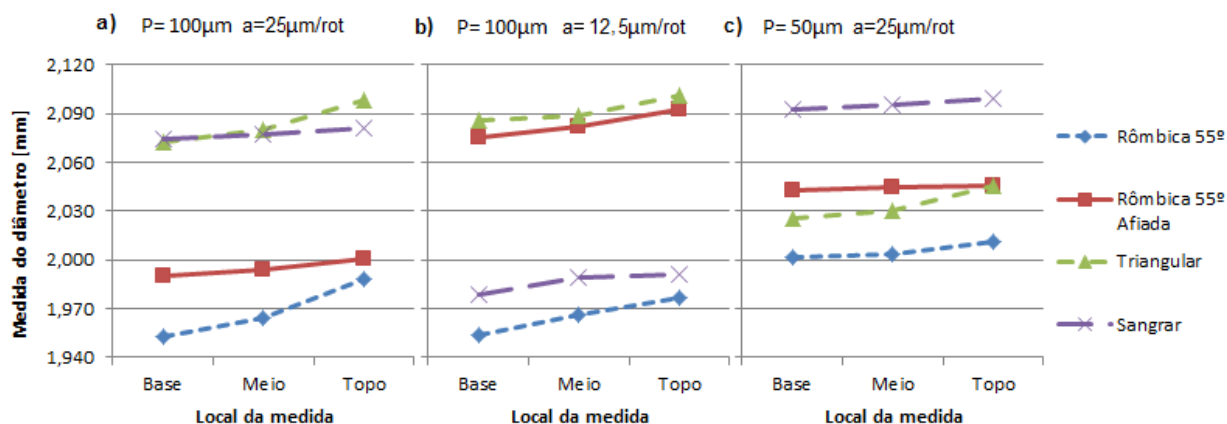
#### 4.2.1.2. Análise de forma

Na Figura 4-12 podemos observar a variação das medidas do diâmetro em função da posição de medição ser na base, no meio ou no topo da peça (Figura 3-12) para cada profundidade de corte com diferentes avanços.

Com a ferramenta triangular, para quaisquer pares de parâmetros estudados, foram obtidas peças com uma conicidade por excesso.

Para o torneamento com  $P=100\mu\text{m}$  e  $a=25\mu\text{m}/\text{rot}$  (Figura 4-12 a)), as pastilhas de sangrar e triangular obtiveram uma conicidade por excesso, enquanto que as pastilhas rômbica 55° e rômbica 55° afiada obtiveram conicidade por defeito. A ferramenta rômbica 55° afiada foi a que obteve diâmetros mais próximos do pretendido (2mm).

No torneamento com  $P=100\mu\text{m}$  e  $a=12,5\mu\text{m/rot}$  (Figura 4-12 b)) verifica-se que a ferramenta rômica  $55^\circ$  e a ferramenta de sangrar obtiveram valores de conicidade cuja cota é por defeito.



**Figura 4-12: Avaliação de forma das peças maquinadas em aço com a)  $P=100\mu\text{m}$  e  $a=25\mu\text{m/rot}$ , b)  $P=100\mu\text{m}$  e  $a=12,5\mu\text{m/rot}$  e c)  $P=50\mu\text{m}$  e  $a=25\mu\text{m/rot}$  para as diferentes ferramentas**

Nas peças maquinadas com  $P=50\mu\text{m}$  e  $a=25\mu\text{m/rot}$  (Figura 4-12 c)) verifica-se que todas obtiveram conicidade por excesso. A conicidade obtida com a ferramenta de sangrar não é elevada mas está distante do diâmetro pretendido (2mm).

Utilizando a equação (4-2) obtiveram-se os valores do ângulo  $\beta$  apresentados na Tabela 4-13. Verifica-se que a ferramenta de sangrar foi a que obteve melhores resultados em termos de menor ângulo de conicidade nas peças maquinadas com  $P=100\mu\text{m}$  para ambos os avanços.

**Tabela 4-13: Valores da conicidade atingida com diferentes ferramentas**

Parâmetros de maquinagem	Ferramenta utilizada	Valor de $\beta$ [°]
Profundidade de corte 100µm Avanço 25µm/rot	Rômica $55^\circ$	0,101
	Rômica $55^\circ$ afiada	0,032
	Triangular	0,079
	Sangrar	0,020
Profundidade de corte 100µm Avanço 12,5µm/rot	Rômica $55^\circ$	0,076
	Rômica $55^\circ$ afiada	0,052
	Triangular	0,043
	Sangrar	0,034
Profundidade de corte 50µm Avanço 25µm/rot	Rômica $55^\circ$	0,026
	Rômica $55^\circ$ afiada	0,009
	Triangular	0,058
	Sangrar	0,017

Nas peças maquinadas com  $P=50\mu\text{m}$  e  $a=25\mu\text{m/rot}$ , a ferramenta que obteve uma geometria mais regular foi a rômica  $55^\circ$  afiada, tendo a ferramenta de sangrar obtido também um valor de  $\beta$  baixo.

Neste caso, a avaliação tendo em conta apenas a forma e a avaliação tendo em conta apenas  $R_a$  convergiram, mostrando que a ferramenta de sangrar poderá ser a mais adequada para efectuar operações de torneamento.

Os valores das medidas que deram origem à Figura 4-12 e à Tabela 4-13 encontram-se apresentados na tabela A 3 em anexo.

## 4.2.2. Microtorneamento do alumínio

### 4.2.2.1. Rugosidade média aritmética ( $R_a$ )

Na Figura 4-13 podemos comparar os resultados obtidos, da rugosidade média aritmética, em função da profundidade de corte e do avanço para as diversas ferramentas utilizadas no microtorneamento do alumínio.

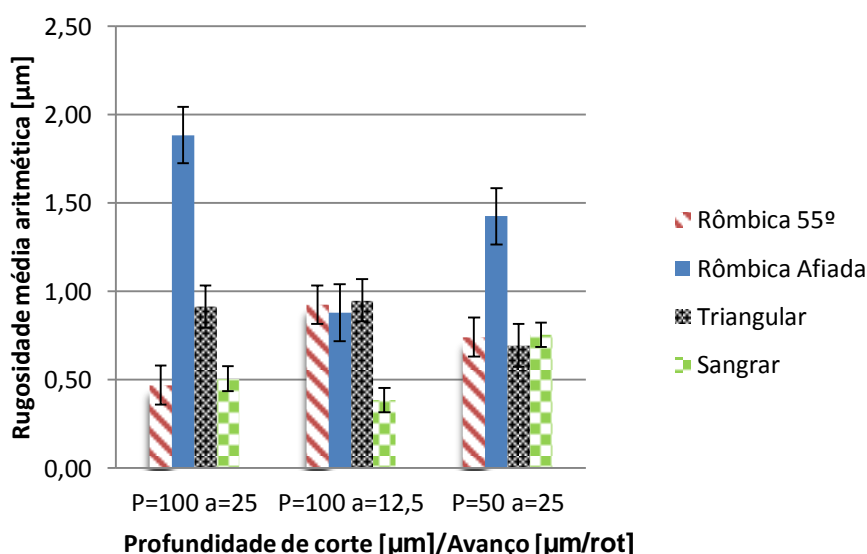


Figura 4-13: Comparação de  $R_a$  tendo em conta a profundidade de corte e o avanço no alumínio

Verificou-se que, para o alumínio, o melhor resultado ocorreu para a ferramenta de sangrar. A melhor peça foi obtida com uma profundidade de corte de  $100\mu\text{m}$  e um avanço de  $12,5\mu\text{m/rot}$ . Notar que na peça efectuada com a profundidade de corte de  $50\mu\text{m}$  e um avanço de  $25\mu\text{m/rot}$  a ferramenta triangular obteve melhores resultados do que a ferramenta de sangrar e a ferramenta rômica  $55^\circ$ .



Os melhores resultados obtidos ocorreram para a pastilha de sangrar, que não foi utilizada transversalmente (forma de maquinar para a qual foi concebida a ferramenta) pois levava a uma oscilação muito grande do varão quando era maquinado, por isso foi utilizada longitudinalmente como as restantes ferramentas.

Os valores das rugosidades que deram origem à Figura 4-13 encontram-se apresentados na tabela A 2 em anexo.

#### 4.2.2.2. Análise de forma

Na Figura 4-14 pode-se observar a variação das medidas do diâmetro em função da posição de medição ser na base, no meio ou no topo da peça (Figura 3-12) para cada profundidade de corte com diferentes avanços.

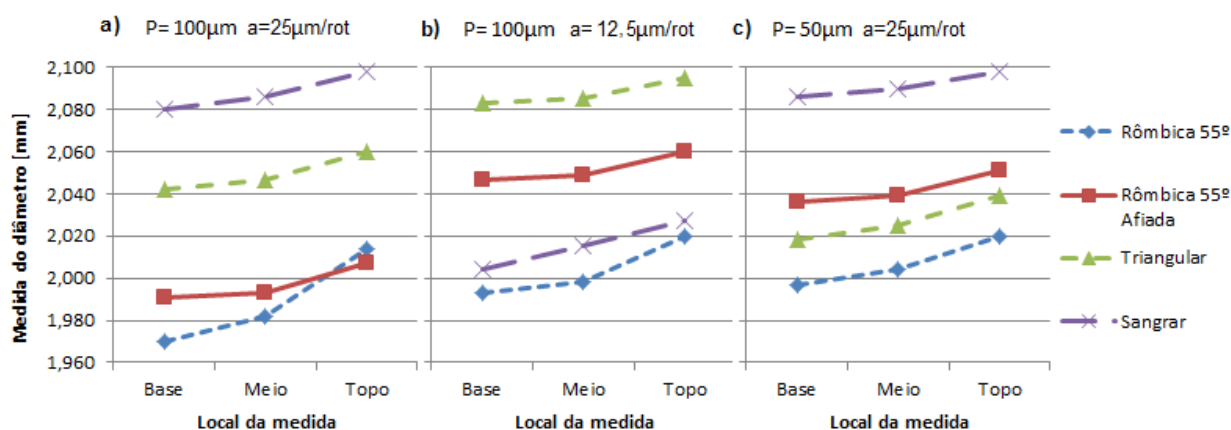


Figura 4-14: Avaliação de forma das peças maquinadas em alumínio com a)  $P=100\mu\text{m}$  e  $a=25\mu\text{m/rot}$ , b)  $P=100\mu\text{m}$  e  $a=12,5\mu\text{m/rot}$  e c)  $P=50\mu\text{m}$  e  $a=25\mu\text{m/rot}$  para as diferentes ferramentas

Para todos os parâmetros estudados a ferramenta de sangrar e a ferramenta triangular obtiveram conicidades por excesso, já a ferramenta rômbica 55° obteve conicidade por defeito na base das peças e por excesso no topo das mesmas.

Verifica-se que no torneamento com  $P=100\mu\text{m}$  e  $a=25\mu\text{m/rot}$  (Figura 4-14 a)) a pastilha rômbica 55° afiada obteve o diâmetro mais próximo do diâmetro pretendido (2mm).

De salientar que para  $P=100\mu\text{m}$  e  $a=12,5\mu\text{m/rot}$  (Figura 4-14 b)) e  $P=50\mu\text{m}$  e  $a=25\mu\text{m/rot}$  (Figura 4-14 c)) todas as ferramentas obtiveram variações de diâmetro muito semelhantes.

Utilizando a equação (4-2) obtiveram-se os valores do ângulo  $\beta$  apresentados na Tabela 4-14. Verifica-se que a ferramenta rômica 55° afiada foi a que obteve melhores resultados nas peças maquinadas com  $P=100\mu\text{m}$  e  $a=25\mu\text{m/rot}$ . Para as peças maquinadas com  $P=100\mu\text{m}$  e  $a=12,5\mu\text{m/rot}$  a ferramenta que obteve uma geometria mais regular foi a ferramenta triangular. Para as peças maquinadas com  $P=50\mu\text{m}$  e  $a=25\mu\text{m/rot}$  a peça que obteve melhores resultados foi a ferramenta de sangrar.

**Tabela 4-14: Valores da conicidade nas peças em alumínio atingida com diferentes ferramentas**

Parâmetros de maquinagem	Ferramenta utilizada	Valor de $\beta$ [°]
Profundidade de corte 100 $\mu\text{m}$ Avanço 25 $\mu\text{m/rot}$	Rômica 55°	0,126
	Rômica 55° afiada	0,046
	Triangular	0,052
	Sangrar	0,053
Profundidade de corte 100 $\mu\text{m}$ Avanço 12,5 $\mu\text{m/rot}$	Rômica 55°	0,078
	Rômica 55° afiada	0,037
	Triangular	0,035
	Sangrar	0,066
Profundidade de corte 50 $\mu\text{m}$ Avanço 25 $\mu\text{m/rot}$	Rômica 55°	0,066
	Rômica 55° afiada	0,043
	Triangular	0,060
	Sangrar	0,034

Os valores com os quais foi efectuada a Figura 4-14 encontram-se apresentados na tabela A 3 em anexo.

#### 4.2.3. Avaliação global

Como referido anteriormente uma avaliação tem de englobar o valor da rugosidade média aritmética ( $R_a$ ), os restantes valores das rugosidades e a avaliação de forma ( $\beta$ ). Assim sendo, procedeu-se à análise tendo em conta a função (4-3) com a qual se obtiveram os valores apresentados na Tabela 4-15, onde  $P$  é a profundidade de corte em  $\mu\text{m}$  e  $a$  é o avanço em  $\mu\text{m/rot}$ .

Os valores destacados na Tabela 4-15 mostram que a geometria de ferramenta que melhores resultados obteve foi a de sangrar, em ambos os materiais.

Tabela 4-15: Valores da avaliação global para ambos os materiais

Ferramenta	Alumínio		Aço	
	Parâmetros de corte	Função (f)	Parâmetros de corte	Função (f)
Sangrar	P=100 a=25	0,161	P=100 a=25	0,171
	P=100 a=12,5	0,203	P=100 a=12,5	0,236
	P=50 a=25	0,544	P=50 a=25	0,108
Rômbica 55° Afiada	P=100 a=25	0,380	P=100 a=25	0,364
	P=100 a=12,5	0,125	P=100 a=12,5	0,347
	P=50 a=25	0,344	P=50 a=25	0,346
Triangular	P=100 a=25	0,277	P=100 a=25	0,390
	P=100 a=12,5	0,163	P=100 a=12,5	0,281
	P=50 a=25	0,228	P=50 a=25	0,245
Rômbica 55°	P=100 a=25	0,336	P=100 a=25	0,323
	P=100 a=12,5	0,278	P=100 a=12,5	0,251
	P=50 a=25	0,227	P=50 a=25	0,168

### 4.3. Lubrificação/Refrigeração da ferramenta

Conhecendo quais as melhores geometrias da ferramenta, foi adicionado um fluido refrigerante ao processo de maquinagem, pois verificava-se que para algumas peças (principalmente no alumínio) existia adesão da apara à ferramenta de corte.

#### 4.3.1. Microtorneamento do aço

##### 4.3.1.1. Rugosidade média aritmética (Ra)

Analisando Ra verifica-se que para o aço na ferramenta rômbica 55° a utilização de lubrificação piora os resultados (Figura 4-15).

Verifica-se a existência de uma melhoria na peça maquinada com  $P=50\mu\text{m}$  e  $a=25\mu\text{m/rot}$  (Figura 4-15) quando esta é maquinada com a ferramenta de sangrar e lubrificação. Para as outras duas peças a lubrificação não é vantajosa, obtendo rugosidades mais elevadas.

Os valores que serviram de base para a Figura 4-15 encontram-se apresentados na tabela A 4 em anexo.

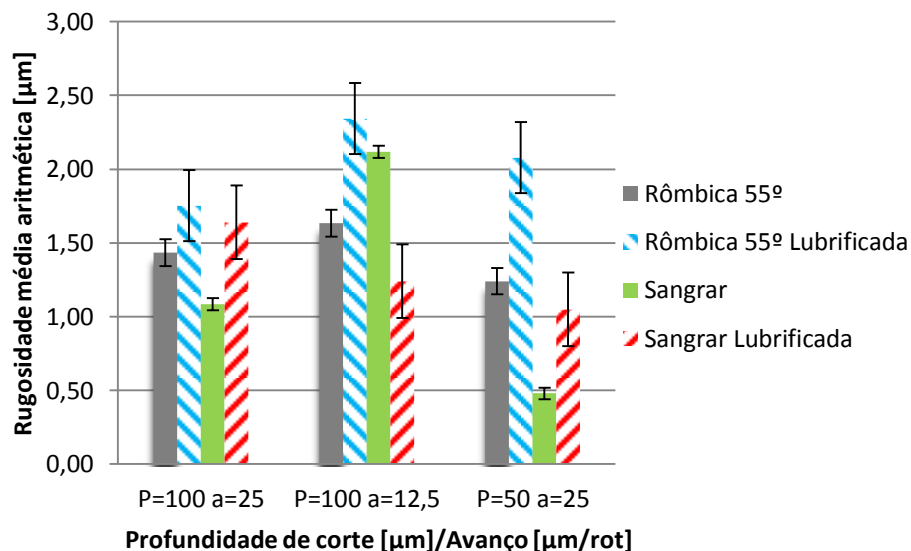


Figura 4-15: Valores de Ra para as ferramentas rômbica 55° e de sangrar, com e sem lubrificação, nas peças maquinadas em aço

Para o aço o estudo em termos de rugosidade média aritmética indica que a utilização de fluido refrigerante não é vantajosa no microtorneamento.

#### 4.3.1.2. Análise de forma

Na Figura 4-16 (os valores das medidas apresentadas na Figura 4-16 encontram-se apresentados na tabela A 5 em anexo) podemos verificar que no torneamento com  $P=100\mu\text{m}$  e  $a=12,5\mu\text{m/rot}$  e  $P=50\mu\text{m}$  e  $a=25\mu\text{m/rot}$  (respectivamente b) e c) na Figura 4-16) a lubrificação provocou uma maior conicidade por excesso para ambas as ferramentas.

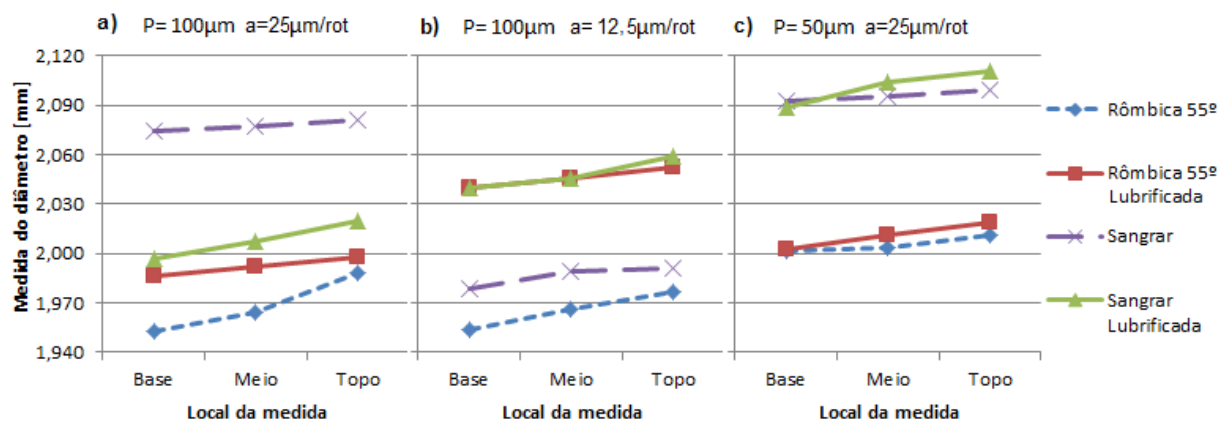


Figura 4-16: Avaliação de forma das peças maquinadas em aço com a)  $P=100\mu\text{m}$  e  $a=25\mu\text{m/rot}$ , b)  $P=100\mu\text{m}$  e  $a=12,5\mu\text{m/rot}$  e c)  $P=50\mu\text{m}$  e  $a=25\mu\text{m/rot}$  para as ferramentas rômbica 55° e de sangrar, com e sem lubrificação

Já para uma maquinagem com  $P=100\mu\text{m}$  e  $a=25\mu\text{m/rot}$  (Figura 4-16 a)) a lubrificação diminui a conicidade da peça maquinada com a ferramenta rômica  $55^\circ$ , que é a única peça efectuada com lubrificação que obteve uma conicidade por defeito.

Utilizando a equação (4-2) obtiveram-se os valores do ângulo  $\beta$  apresentados na Tabela 4-16.

Verifica-se que a ferramenta de sangrar sem lubrificação obteve, em todas as peças, os melhores resultados.

Com base na análise de forma também se pode afirmar que a lubrificação não parece ser vantajosa no processo de torneamento do aço.

**Tabela 4-16: Valores da conicidade nas peças em aço atingida com e sem lubrificação**

Parâmetros de maquinagem	Ferramenta utilizada	Valor de $\beta$ [°]
Profundidade de corte 100 $\mu\text{m}$ Avanço 25 $\mu\text{m/rot}$	Rômica $55^\circ$	0,101
	Rômica $55^\circ$ lubrificada	0,035
	Sangrar	0,020
	Sangrar lubrificada	0,066
Profundidade de corte 100 $\mu\text{m}$ Avanço 12,5 $\mu\text{m/rot}$	Rômica $55^\circ$	0,066
	Rômica $55^\circ$ lubrificada	0,035
	Sangrar	0,035
	Sangrar lubrificada	0,055
Profundidade de corte 50 $\mu\text{m}$ Avanço 25 $\mu\text{m/rot}$	Rômica $55^\circ$	0,026
	Rômica $55^\circ$ lubrificada	0,046
	Sangrar	0,017
	Sangrar lubrificada	0,063

### 4.3.2. Micromaquinagem do alumínio

#### 4.3.2.1. Rugosidade média aritmética ( $R_a$ )

Na Figura 4-17 podemos verificar o valor da rugosidade média aritmética em função da profundidade de corte e do avanço para as ferramentas rômica  $55^\circ$  e de sangrar utilizadas com ou sem lubrificação.

Para a ferramenta rômica  $55^\circ$  a lubrificação prejudica a maquinagem das peças. Na ferramenta de sangrar existe uma melhoria na peça maquinada com uma profundidade de corte de 100 $\mu\text{m}$  e um avanço de 25  $\mu\text{m/rot}$ , mas um pior acabamento nas restantes.

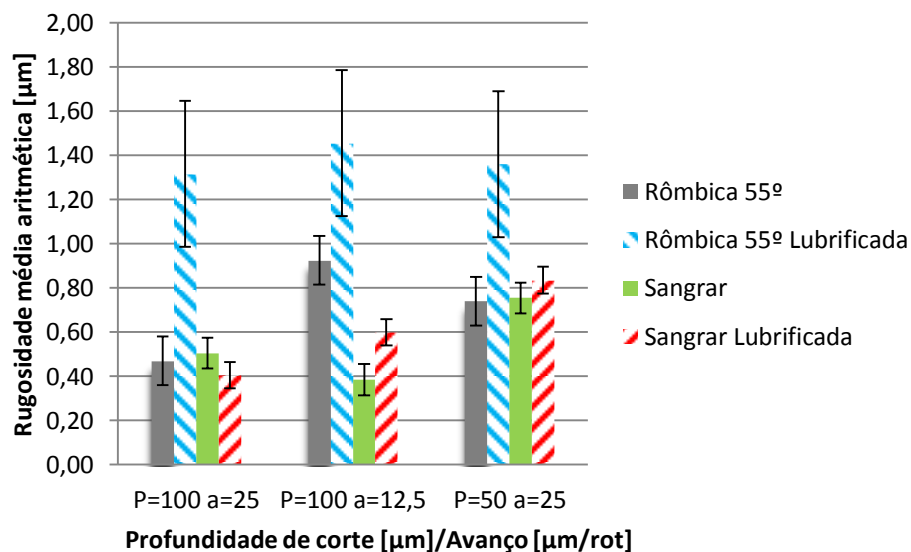


Figura 4-17: Valores de Ra para as ferramentas rômbica 55° e de sangrar, com e sem lubrificação, nas peças maquinadas em alumínio

Assim como no caso do aço, a análise dos resultados obtidos tendo em conta apenas os valores de Ra não é esclarecedora no que diz respeito à utilização de fluido refrigerante.

Os valores de todas as rugosidades medidas encontram-se apresentados na tabela A 4 em anexo.

#### 4.3.2.2. Análise de forma

Na Figura 4-18 podemos verificar que a utilização de lubrificação diminui a conicidade nas peças maquinadas com ambas as ferramentas para todas as combinações de parâmetros estudados.

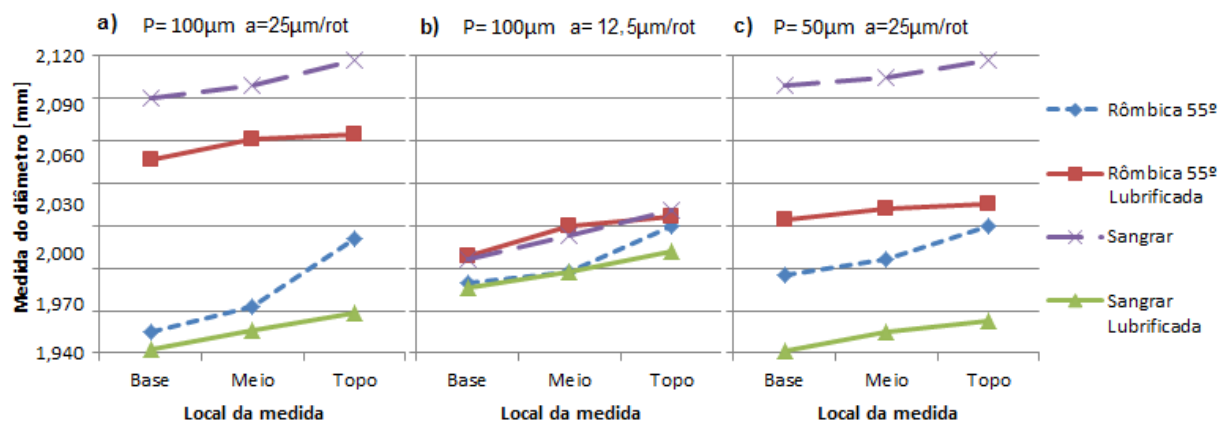


Figura 4-18: Avaliação de forma das peças maquinadas em alumínio com a) P=100μm e a=25μm/rot, b) P=100μm e a=12,5μm/rot e c) P=50μm e a=25μm/rot para as ferramentas rômbica 55° e de sangrar, com e sem lubrificação

Notar que a lubrificação na ferramenta de sangrar provocou uma conicidade por defeito em todas as combinações de parâmetros estudados, assim como a lubrificação na ferramenta rômbica provocou uma conicidade por excesso em todas as peças efectuadas.

Os valores das medidas efectuadas encontram-se apresentados na tabela A 5 em anexo.

Recorrendo à equação (4-2) calcularam-se os valores do ângulo  $\beta$  que estão apresentados na Tabela 4-17. Verifica-se que a ferramenta rômbica 55° utilizada com lubrificação obteve os melhores resultados, que se encontram destacados na Tabela 4-17, para a maquinagem com  $P=100\mu\text{m}$  e  $a=25\mu\text{m/rot}$  e  $P=50\mu\text{m}$  e  $a=25\mu\text{m/rot}$ . Para  $P=100\mu\text{m}$  e  $a=12,5\mu\text{m/rot}$  foi a ferramenta de sangrar com lubrificação que obteve melhores resultados.

**Tabela 4-17: Valores da conicidade nas peças em alumínio atingida com e sem lubrificação**

Parâmetros de maquinagem	Ferramenta utilizada	Valor de $\beta$ [°]
Profundidade de corte 100 $\mu\text{m}$ Avanço 25 $\mu\text{m/rot}$	Rômbica 55°	0,126
	Rômbica 55° lubrificada	0,035
	Sangrar	0,052
	Sangrar lubrificada	0,049
Profundidade de corte 100 $\mu\text{m}$ Avanço 12,5 $\mu\text{m/rot}$	Rômbica 55°	0,078
	Rômbica 55° lubrificada	0,052
	Sangrar	0,066
	Sangrar lubrificada	0,049
Profundidade de corte 50 $\mu\text{m}$ Avanço 25 $\mu\text{m/rot}$	Rômbica 55°	0,066
	Rômbica 55° lubrificada	0,020
	Sangrar	0,035
	Sangrar lubrificada	0,040

Da análise efectuada com base na forma, verifica-se que a utilização de lubrificação no alumínio poderá ser vantajosa, já no aço a lubrificação não parece levar a melhorias no processo de maquinagem.

#### 4.3.3. Avaliação global

Também neste caso foi efectuada a análise tendo em conta a função (4-3) com a qual se obtiveram os valores apresentados na Tabela 4-18 onde  $P$  é a profundidade de corte em  $\mu\text{m}$  e  $a$  é o avanço em  $\mu\text{m/rot}$ .

Tabela 4-18: Valores da avaliação global para as ferramentas rômica 55° e de sangrar, com e sem lubrificação, para ambos os materiais

Ferramenta	Alumínio		Aço	
	Parâmetros de corte	Função (f)	Parâmetros de corte	Função (f)
Sangrar	P=100 a=25	0,161	P=100 a=25	0,171
	P=100 a=12,5	0,203	P=100 a=12,5	0,237
	P=50 a=25	0,544	P=50 a=25	0,108
Rômica 55°	P=100 a=25	0,336	P=100 a=25	0,323
	P=100 a=12,5	0,278	P=100 a=12,5	0,251
	P=50 a=25	0,227	P=50 a=25	0,168
Sangrar com lubrificação	P=100 a=25	0,140	P=100 a=25	0,601
	P=100 a=12,5	0,292	P=100 a=12,5	0,452
	P=50 a=25	0,551	P=50 a=25	0,222
Rômica 55° com Lubrificação	P=100 a=25	0,366	P=100 a=25	0,428
	P=100 a=12,5	0,388	P=100 a=12,5	0,274
	P=50 a=25	0,306	P=50 a=25	0,429

Os valores destacados na Tabela 4-15 mostram que a geometria de ferramenta que obteve melhores resultados foi a de sangrar sem a utilização de fluido refrigerante, em ambos os materiais.

#### 4.4. Miniaturização

Finalizado o processo de escolha dos melhores parâmetros de corte, da melhor geometria de ferramenta e da utilização ou não de lubrificação, obtiveram-se os seguintes resultados:

- No aço a melhor peça foi obtida com  $P=300\mu\text{m}$   $a=12,5\mu\text{m/rot}$ ;
- No alumínio a melhor peça foi obtida com  $P=300\mu\text{m}$   $a=25\mu\text{m/rot}$ ;
- A melhor geometria para ambos os materiais foi a ferramenta de sangrar utilizada com uma estratégia de maquinagem longitudinal;
- Não parece vantajoso utilizar lubrificação em nenhum material;

Tendo em conta estes resultados foi inicialmente utilizada a ferramenta de sangrar para efectuar a miniaturização de peças (diâmetros menores de 2mm), mas verificou-se que a micropeça fracturava facilmente devido ao contacto permanente entre a aresta de corte da ferramenta e a peça, que a impedia de vibrar livremente. Como se pode observar na Figura 4-19, a peça tende a vibrar segundo as setas, ou



seja, perpendicular ao eixo, mas como a ferramenta de sangrar tem uma geometria paralela ao eixo impede essa vibração o que na maquinagem de peças com diâmetros inferiores a 1,75mm no aço e 0,75mm no alumínio leva à sua fractura.

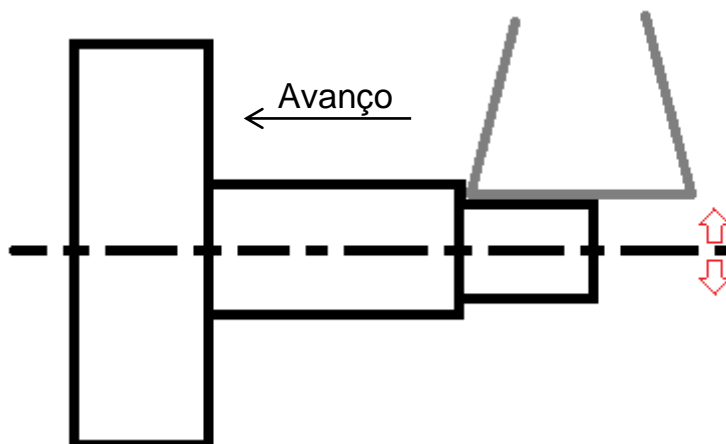


Figura 4-19: Contacto entre a ferramenta de sangrar e a peça

Para levar a cabo o estudo da miniaturização, escolheu-se então a ferramenta rômbica 55° e os parâmetros apresentados na Tabela 4-19.

Tabela 4-19: Parâmetros escolhidos para a operação de miniaturização para ambos os materiais

Escolha	Profundidade de Corte [ $\mu\text{m}$ ]	Avanço [ $\mu\text{m}/\text{rot}$ ]
Aço	50	25
Alumínio	100	12,5

#### 4.4.1. Peça em escada

Para efectuar a miniaturização efectuou-se uma peça em escada com três patamares de 5mm de comprimento cada, Figura 4-20, variando os seus diâmetros conforme a Tabela 4-20. Utilizou-se a ferramenta de sangrar e a ferramenta rômbica 55°.

Com a ferramenta de sangrar foi possível efectuar três micropeças (A, B e C na Tabela 4-20) no alumínio com uma profundidade de corte de 100 $\mu\text{m}$  e um avanço de 25 $\mu\text{m}/\text{rot}$ . No aço não foi possível efectuar nenhuma micropeça, visto que ao efectuar a passagem para diâmetros inferiores a 1,50mm a peça fracturava.

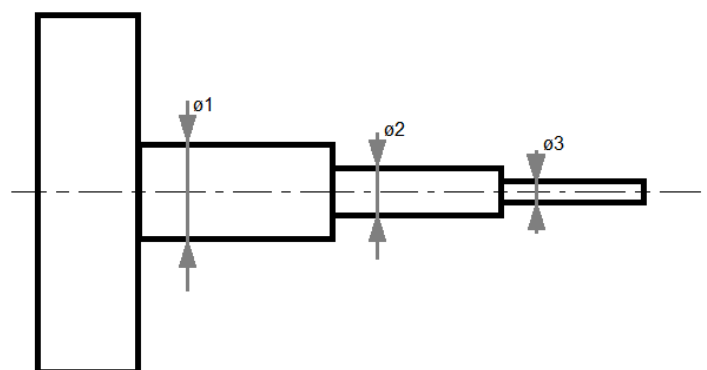


Figura 4-20: Peça em escada

Com a ferramenta rômica  $55^\circ$  foi possível efectuar algumas peças em escada em ambos os materiais.

No aço apenas foi possível efectuar a peça com os diâmetros A da Tabela 4-20, pois para as restantes peças ocorria a fractura da peça durante o processo de torneamento. No alumínio foi possível efectuar as peças A e B da Tabela 4-20, fracturando para os diâmetros C.

Tabela 4-20: Diâmetros da peça em escada

Peça	Ø1 [mm]	Ø2 [mm]	Ø3 [mm]
A	2,25	1,75	1,25
B	2,00	1,50	1,00
C	1,75	1,25	0,75

Como a peça com dimensões mais reduzidas obtida foi a peça C na Tabela 4-20, utilizando a ferramenta de sangrar numa estratégia de corte longitudinal, as suas dimensões, rugosidades e aspecto estão apresentados na Figura 4-21.

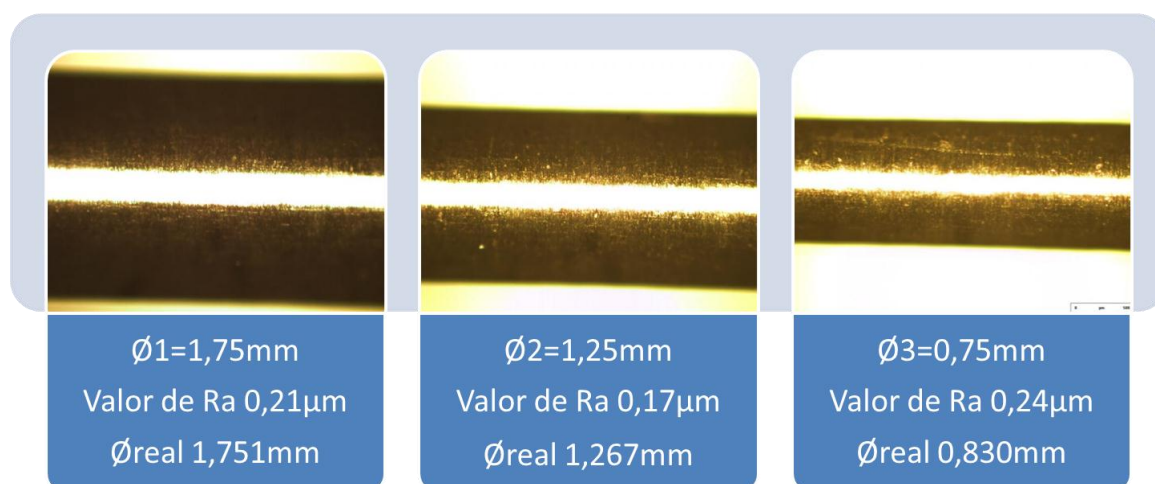


Figura 4-21: Superfície e rugosidade da peça C em escada em alumínio

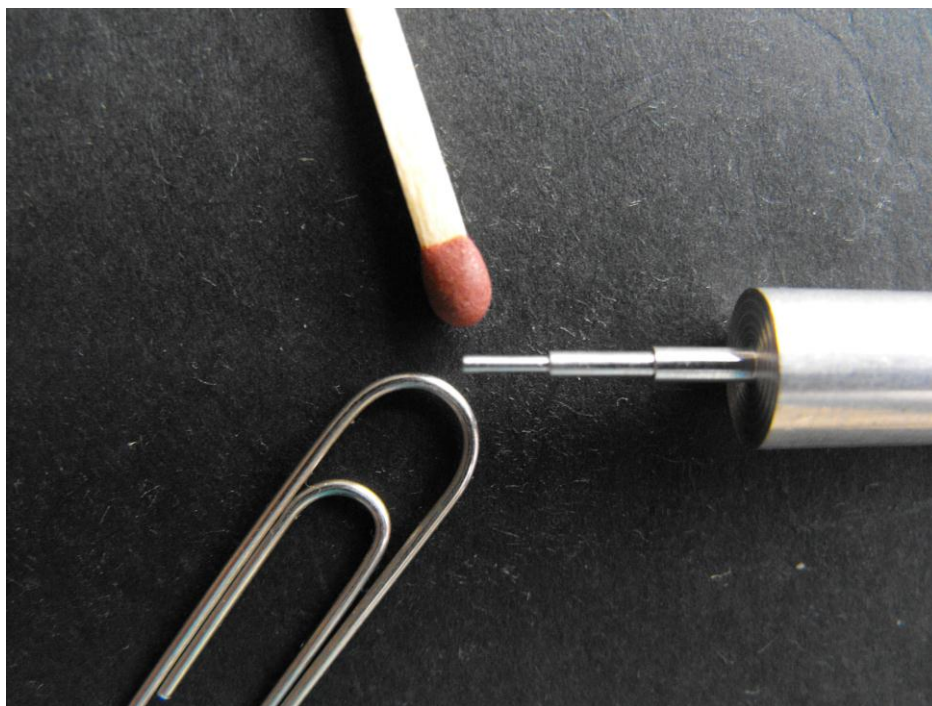
Analisando os parâmetros da rugosidade, que estão apresentadas na Tabela 4-21, verifica-se o seguinte:

- Existem poucos picos ( $P_c$ ) o que mostra a uniformidade da superfície;
- Os valores da rugosidade média aritmética ( $R_a$ ) são os mais baixos de todo o estudo;
- A amplitude máxima da rugosidade,  $R_t$  (do pico mais alto ao vale mais baixo), tem os valores mais baixos de todo o estudo;
- A rugosidade média geométrica ( $R_q$ ) também apresenta os valores mais baixos de todo o estudo efectuado;
- O passo médio da rugosidade ( $S_m$ ) apresenta os valores mais altos estudados;
- A profundidade média de aplainamento ( $R_{pm}$ ) apresenta os valores mais baixos de todo o estudo.

**Tabela 4-21: Rugosidades da peça C em escada do alumínio (valores em  $\mu m$ )**

Rugosidade	$\varnothing 1,75mm$	$\varnothing 1,25mm$	$\varnothing 0,75mm$
$R_a$	0,21	0,17	0,24
$R_zD$	1,59	1,40	2,05
$R_zI$	2,11	1,70	2,36
$R_{mD}$	2,77	2,13	3,22
$R_t$	2,81	2,33	3,36
$R_p$	1,01	0,84	1,14
$R_{pm}$	0,61	0,52	0,73
$R_q$	0,31	0,25	0,37
$R_{3z}$	1,00	0,85	0,94
$P_t$	3,43	3,21	4,41
$P_c$	12	16	16
$S_m$	891,28	906,46	906,46

Esta peça em escada já apresenta diâmetros muito reduzidos. A Figura 4-22 permite ter uma noção mais correcta dos diâmetros aqui tratados, utilizando como referências objectos de uso diário como um fósforo e um clip.



**Figura 4-22: Comparação entre a peça C em escada, um fósforo e um clip**

Na Figura 4-23 podemos comparar a peça C em escada a um lápis de minas 0,5mm de diâmetro, cuja mina é calibrada.



**Figura 4-23: Comparação entre a peça C em escada e um lápis de minas 0,5mm**

#### 4.4.2. Menor diâmetro obtido

Ao verificar que era possível obter peças com diâmetros de 0,75mm com um comprimento de 5mm, recorrendo à ferramenta rômica 55°, efectuaram-se experiências para verificar a possibilidade de miniaturizar ainda mais esse diâmetro.

Inicialmente foi efectuada uma peça com 0,75mm de diâmetro e 5mm de comprimento, em ambos os materiais (peça A• na Tabela 4-22). Ao diminuir esse diâmetro para 0,60mm, mantendo o comprimento, verificou-se que as peças fracturavam. No aço a peça cedia na passagem dos 0,72mm e no alumínio na passagem dos 0,70mm.

Verificando a impossibilidade de maquinar diâmetros mais pequenos em peças com 5mm de comprimento, este foi diminuído para 2mm e o diâmetro reduzido para 0,50mm. Com esses valores foi possível obter as peças em ambos os materiais (peça B na Tabela 4-20).

O diâmetro pretendido foi diminuído para 0,25mm. Ao longo da maquinaria verificou-se que para o aço a peça fracturava na passagem dos 0,35mm de diâmetro e para o alumínio essa fractura deu-se na passagem dos 0,30mm de diâmetro (peça C na Tabela 4-20).

Tabela 4-22: Medidas da miniaturização

Material	Tamanho teórico (mm)	Comprimento l (mm)	Diâmetro real d (mm)	Designação	Relação l/d
Aço	0,75	5	0,858	A•	5,83
Alumínio	0,75	5	0,767	A•	6,51
Aço	0,50	2	0,588	B	3,40
Alumínio	0,50	2	0,519	B	3,85
Aço	0,25	2	Fracturava aos 0,35	C	-
Alumínio	0,25	2	Fracturava aos 0,30	C	-
Aço	0,40	2	0,496	D	4,03
Alumínio	0,35	2	0,391	D	5,11
Aço	0,50	3,5	0,626	E	5,59
Alumínio	0,50	3,5	0,527	E	6,64

Como se averiguou que as peças fracturavam nesses diâmetros, foram testados os diâmetros em que a última passagem efectuada nas peças C da Tabela 4-22

permaneceram intactas, tendo para o aço o valor de 0,40mm e para o alumínio 0,35mm.

Ao maquinar com esses diâmetros (peças D na Tabela 4-22) verificou-se que as peças se mantiveram intactas, mas durante as últimas passagens era perceptível a curva formada durante a maquinagem e, ao analisar com o microscópio, apurou-se a existência de conicidade, mais visível no alumínio, como se pode observar na Figura 4-25, do que no aço, Figura 4-26, onde se verifica que a peça tem uma qualidade superficial baixa.

Para verificar a relação diâmetro/comprimento de corte foi efectuada outra peça em cada material (peça E na Tabela 4-22) tentando, para um comprimento de 3,5mm, atingir o menor diâmetro possível. No aço esse valor foi de 0,626mm e no alumínio foi de 0,527mm.

Como se pode observar na Figura 4-24, a relação  $l/d$  obtida para o alumínio está muito mais próxima da relação teórica (valores do diâmetro e do comprimento da peça inseridos na consola do torno aquando da sua programação).

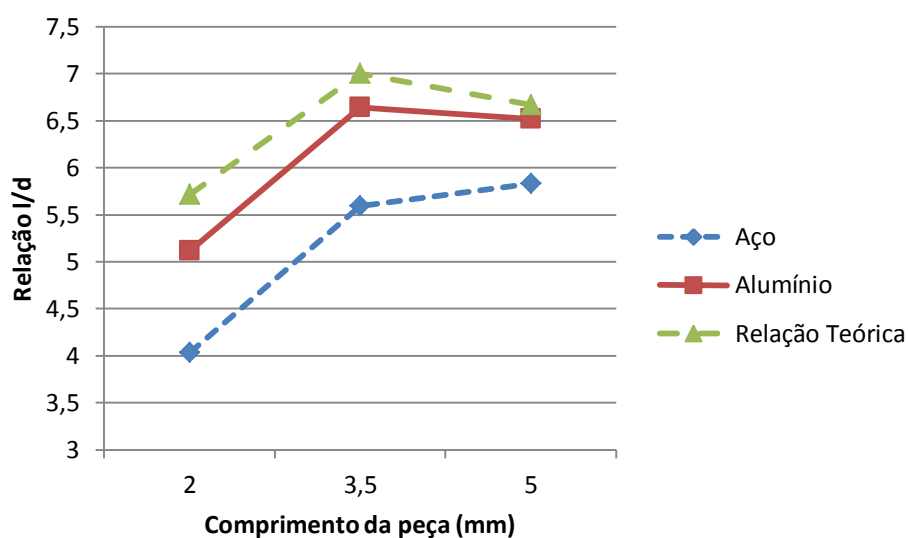
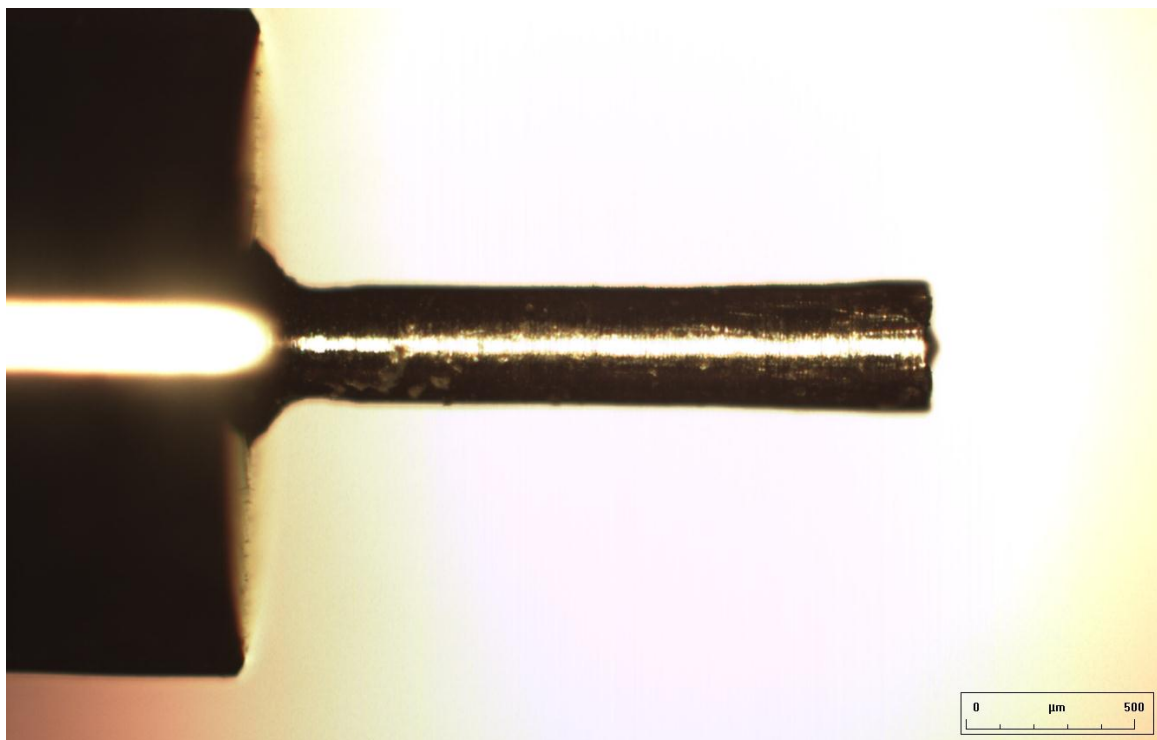


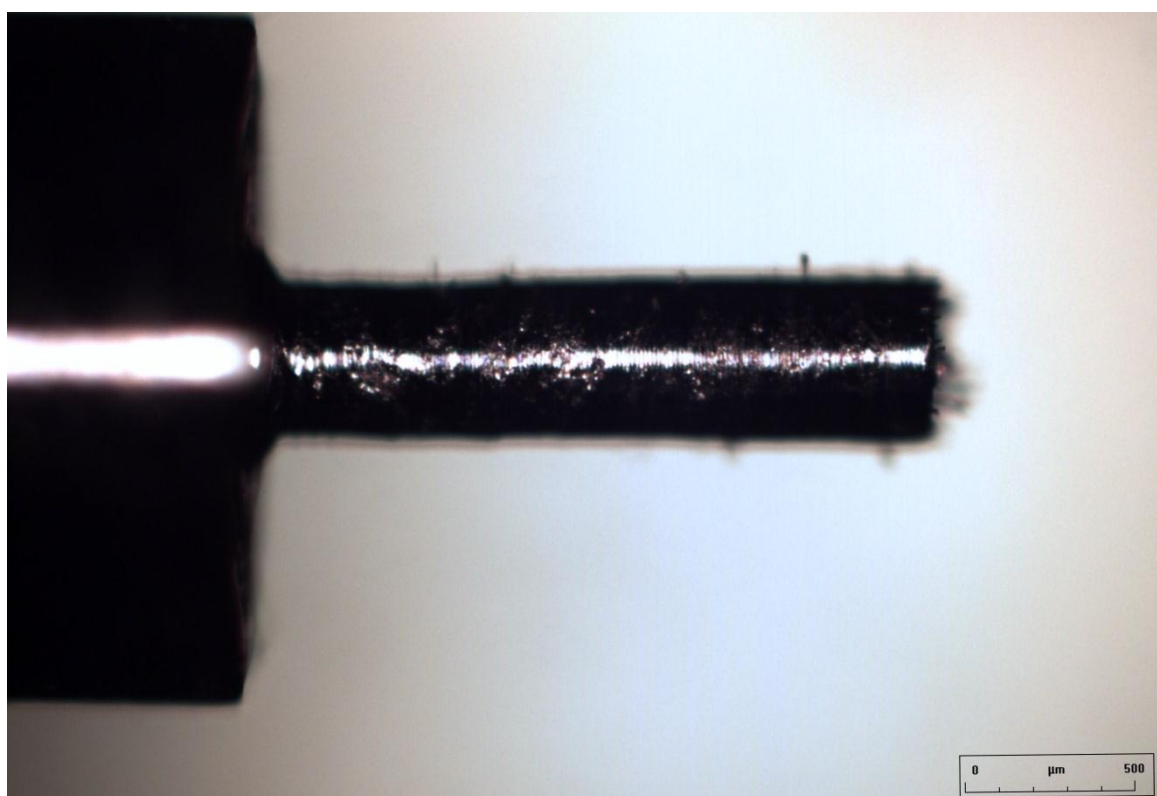
Figura 4-24: Relação entre o comprimento e o diâmetro da peça

No alumínio a micropeça apresenta defeitos de forma na base, como se pode verificar na Figura 4-25.



**Figura 4-25: Peça D em alumínio**

A peça com menor diâmetro obtida no aço está representada na Figura 4-26 onde se pode verificar que, em termos de geometria apresenta uma forma regular, no entanto o seu acabamento superficial é fraco.



**Figura 4-26: Peça D em aço**

Um dos factores que se utilizou para verificar a qualidade da peça produzida foi a medição da rugosidade, mas nas micropeças apresentadas na Tabela 4-22 (excepto a A•) isso não foi possível, pois a ponta de medição do rugosímetro necessitava de pelo menos 4mm de superfície contínua, mesmo estando a trabalhar com a distância de apalpação mais curta disponível ( $L_t = 1,5\text{mm}$ ).

#### 4.4.2.1. Peça de 0,75mm de diâmetro

Na Tabela 4-23 estão apresentados os valores da rugosidade medida na peça A• em ambos os materiais, verificando-se que o valor de  $R_a$  no alumínio é  $0,60\mu\text{m}$  e no aço é de  $2,24\mu\text{m}$ .

Tabela 4-23: Valores da rugosidade da peça A• apresentados em  $\mu\text{m}$

Parâmetro	Alumínio	Aço
<b>Ra</b>	0,60	2,24
<b>RzD</b>	3,28	9,62
<b>RzI</b>	3,66	15,71
<b>RmD</b>	4,02	22,09
<b>Rt</b>	4,16	23,53
<b>Rp</b>	2,13	17,12
<b>Rpm</b>	1,66	5,00
<b>Rq</b>	0,75	3,76
<b>R3z</b>	2,32	N/D
<b>Pt</b>	8,86	40,35
<b>Pc</b>	108	36
<b>Sm</b>	219,25	676,58

Também o aspecto da superfície parece mostrar que os resultados obtidos são melhores no alumínio do que no aço. Na Figura 4-27 consegue observar-se que a qualidade do acabamento no aço é inferior à do alumínio, existindo defeitos no início e no final da peça (destacados na Figura 4-27).

Para o alumínio a qualidade superficial parece satisfatória, tendo uma superfície sem irregularidades aparentes.



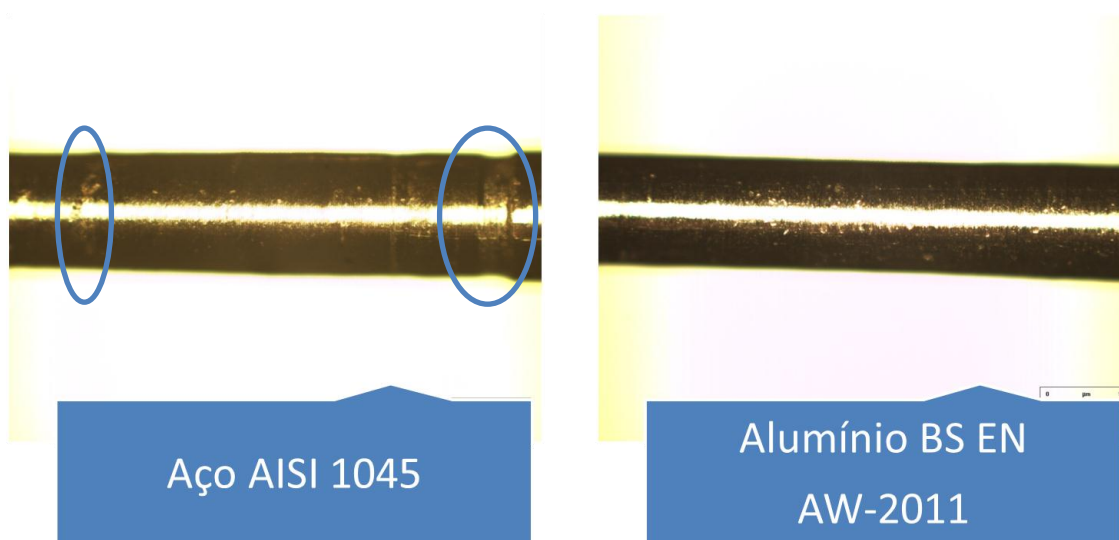


Figura 4-27: Fotografias da superfície da peça A• em ambos os materiais

#### 4.4.3. Formas mais complexas

O cilindro é uma forma simples e fácil de fabricar, mas outros formatos podem não ser possíveis de efectuar com dimensões tão reduzidas. Com o intuito de verificar se tal é possível foi projectada uma peça modelo com base nos resultados anteriormente obtidos, com variações na geometria da mesma. A peça projectada tem as dimensões e formato apresentados na Figura 4-28.

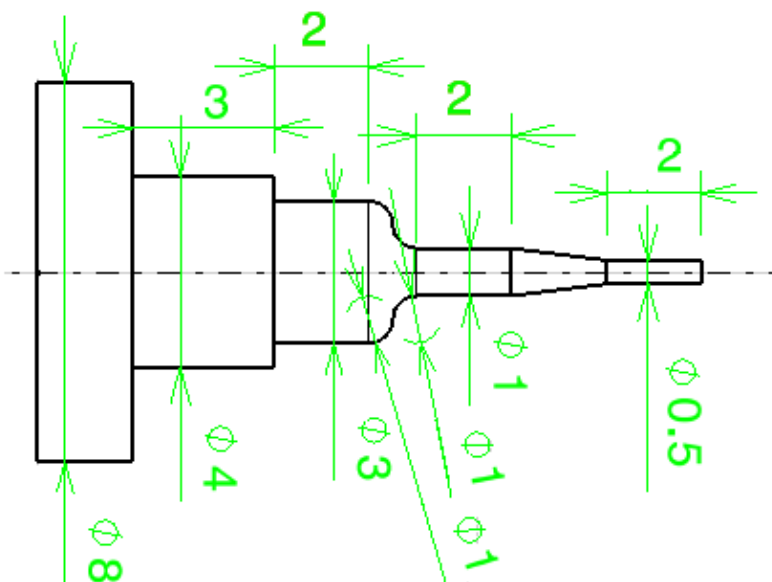
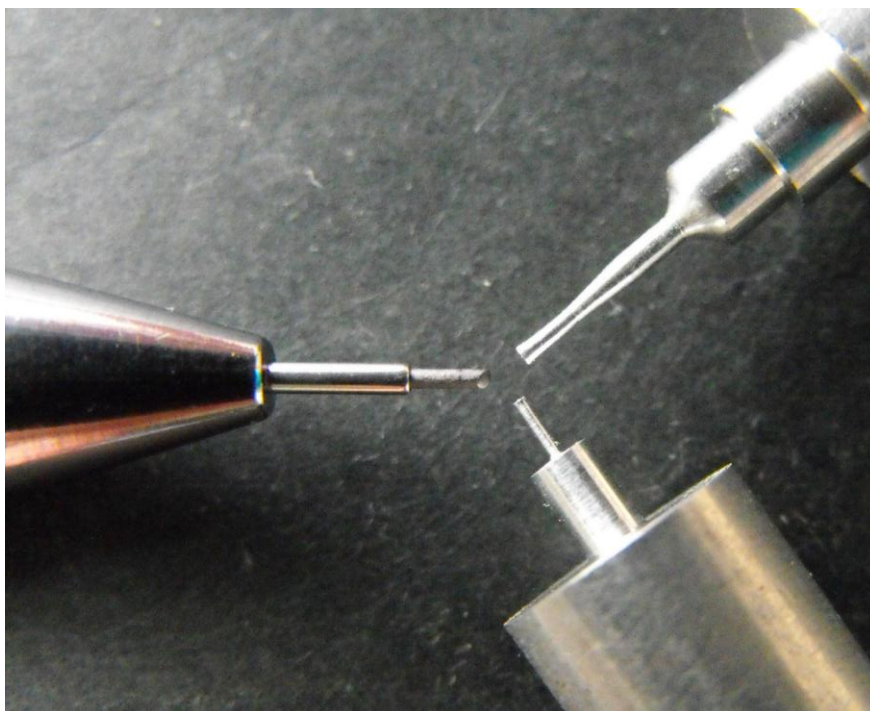
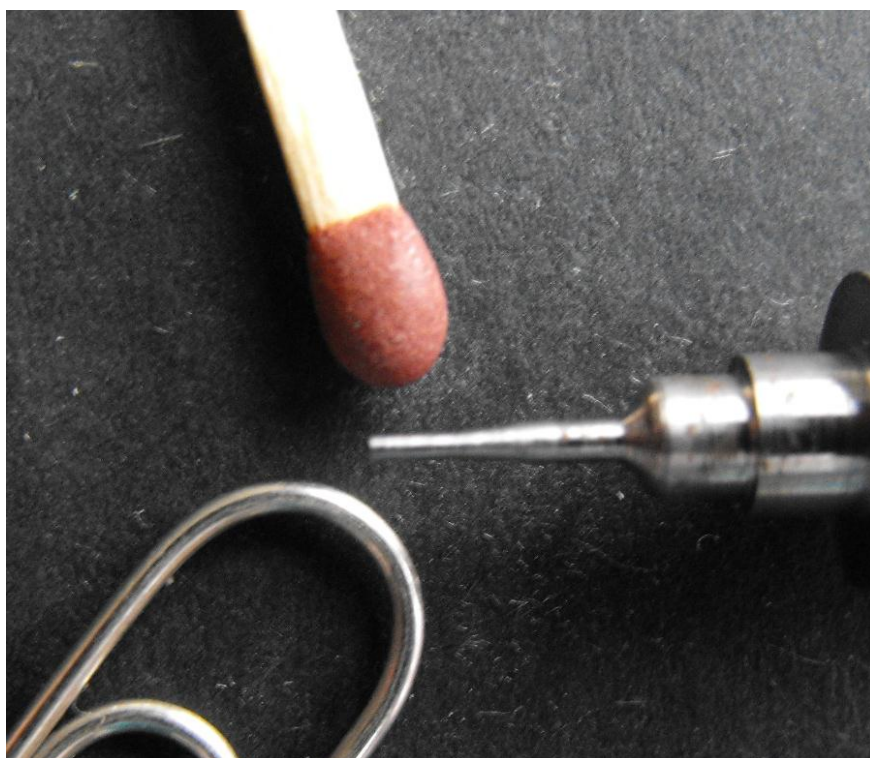


Figura 4-28: Cotas da micropeça modelo com geometria mais complexa [mm]

A peça que foi possível maquinar encontra-se apresentada na Figura 4-29 e na Figura 4-30, onde é comparada a objectos de uso comum e à peça obtida com menor diâmetro.




**Figura 4-29: Peça com forma mais complexa comparada à peça com menor diâmetro obtido e ao lápis de minas de 0,5mm**



**Figura 4-30: Peça com a forma mais complexa comparada com objectos de uso comum como um fósforo e um clip**

Na Tabela 4-24 podemos confirmar a diferença dimensional entre o aço, o alumínio e a dimensão teórica para as duas peças modelo maquinadas para cada material.

Tabela 4-24: Medidas dos diâmetros da peça modelo



Medida Teórica	4 [mm]	3 [mm]	1 [mm]	0,5 [mm]	0,5 [mm]
Aço 1	4,032	3,026	1,024	0,589	0,633
Aço 2	4,038	3,035	1,010	0,574	0,619
Alumínio 1	3,998	3,005	0,997	0,593	0,650
Alumínio 2	4,006	3,002	0,930	0,535	0,614

Verifica-se, na análise da Tabela 4-24, que no alumínio as dimensões obtidas estão mais próximas das dimensões teóricas do que no aço.

A precisão e repetibilidade que o torno CNC utilizado apresenta não é tão boa quanto o desejável para operações de microtorneamento.



## Capítulo 5

---

### 5. Conclusões e trabalhos futuros

Do estudo realizado verificou-se que é possível efectuar microtorneamento em tornos CNC convencionais, sendo necessário estudar os parâmetros de corte e as geometrias da ferramenta de corte a utilizar, e o material a maquinar, antes de se proceder ao fabrico das peças. As principais conclusões retiradas deste estudo foram as seguintes:

- Os melhores parâmetros para microtorneamento dependem do material a maquinar;
- O afiamento das ferramentas é dispensável, piorando claramente os resultados obtidos em termos de precisão dimensional e acabamento de superfície;
- A geometria da ferramenta mais apropriada para ambos os materiais foi a ferramenta de sangrar utilizada num corte longitudinal, sendo a aresta principal de corte e a aresta secundária de alisamento;

- A utilização de fluido refrigerante parece não beneficiar o processo de microtorneamento;
- Os melhores parâmetros para o aço AISI 1045 foram:
  - Avanço: 12,5 $\mu$ m/rot;
  - Profundidade de corte: 300 $\mu$ m;
- Os melhores parâmetros para o alumínio BS EN AW-2011 foram:
  - Avanço: 25 $\mu$ m/rot;
  - Profundidade de corte: 300 $\mu$ m;
- Na miniaturização verificou-se que é possível obter diâmetros muito pequenos respeitando a relação l/d de 6 no alumínio e de 5 no aço;
- Quanto mais pequeno o diâmetro a maquinar, mais complicado é evitar a conicidade;
- É possível efectuar geometrias mais complexas do que apenas cilindros com dimensões menores que 1 mm de diâmetro;

Após a investigação efectuada do microtorneamento, propõem-se alguns trabalhos que poderiam ser efectuados no futuro:

- Utilização de outras geometrias de corte;
- Utilização de outros materiais de ferramenta, tais como, PCD, Cermets, Carbonetos revestidos;
- Utilização de outros materiais a maquinar, metálicos e não metálicos;
- Utilização de novas estratégias de maquinagem.

## 6. Referências

**Almeida Artur** A evolução dos processos de produção [Livro]. - São Paulo : [s.n.], 2009.

**Alting L., Kimura F., Hansen H.N. e Bissacco, G.** Micro Engineering [Artigo]. - 2006.

**Asad A.B.M.A., Masaki Takeshi, Rahman M., Lim, H.S. e Wong, Y.S.** Tool-based micro-machining [Artigo] // Journal of Materials Processing Technology. - 2007. - Vols. 192-193. - pp. 204-211.

**Borges M.** [Online] // Processos Produtivos em Engenharia de Produção. - 2009. - 24 e 25 de Junho de 2010. - <http://mmborges.com/processos/>.

**Coelho Reginaldo Teixeira e Arai Ricardo** Processos de maquinagem para micro-componentes [Livro]. - 2007.

**Egashira K., Mizutani K.** Micro-drilling of monocrystalline silicon using a cutting tool [Jornal] // Precision Engineering 26. - 2002. - pp. 263-268.

**Ferraresi Dino** Fundamentos de Usinagem dos Metais [Livro]. - [s.l.] : Edgard Blücher. - pp. 608-609

**Gaitonde V. N., Karnik S. R., Silva L. R., Abrão A. M. e Davim, J.P.** Machinability Study im Microturning of PA66 GF30 Polyamide whit a PCD Tool [Artigo] // Materials and Manufacturing Processes. - [s.l.] : Taylor & Francis, 2009. - Vol. 20. - pp. 1290-1296.

**Kim Jeong-du e Nam Soo-Ryong** Development of a micro-depth control system for an ultra-precision lathe using a piezo-electric actuator [Jornal] // International Journal of Machine Tools and Manufacture. - 1995. - pp. 495-509.

**Liu Kai e Melkote Shreyes N.** Effect of plastic side flow on surface roughness in micro-turning process [Jornal] // International Journal of Machine Tools & Manufacture. - 2006. - Vol. 46. - pp. 1778-1785.

**Lu Zinan e Yoneyama Takeshi** Micro cutting in the micro lathe turning system [Jornal] // International Journal of Machine Tools & Manufacture 39. - 1999. - Vol. 39. - pp. 1171-1183.

**MINAM** Vision for Micro and Nanomanufacturing. - [s.l.] : Copyright © MINAM, 2008.

**Piotrowska Iwona, Brandt Christina, Karimi Homid Reza e Mass, Peter** Mathematical model of micro turning process [Artigo] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. - 2009. - Vol. 45. - pp. 33-40.

**Prasad J.Hari** Experimental Studies on Microturning [Artigo] // a Thesis. - India : [s.n.], Maio de 2007. - pp. 1-21.

**Rahman Azizur M., Kumar Senthil A. e Lim H.S.** CNC microturning: an application to miniaturization [Jornal] // International Journal of Machine Tools & Manufacture. - 2005. - Vol. 45. - pp. 631-639.

**Rettie Thomas** [Online] // Centro de informação Metal Mecânica. - 2009. - 26 de Junho de 2010. - [http://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir\\_noticia/5621-o-bom-e-velho-torno](http://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/5621-o-bom-e-velho-torno).

**Staudenmann Geri e Moreno Julia** Tornos - Swiss machine-tool manufacturer [Online]. - 2010. - Agosto de 2010. - [www.tornos.com](http://www.tornos.com).

**Sumio Ito, Daisuke Itijima, Akira Hayashi, Hisayuki Aoyama e Masashi Yamanaka** Micro Turning System: A Super Small CNC Precision Lathe for Microfactories // ASPE 2002, Poster Session I, Abstract 987. - Tokyo e Sendai : [s.n.], 2002.



## Anexos

---

A 1: Medidas e ângulo de conicidade das peças com acabamento, utilizando a ferramenta rômica 55°, tendo em conta o avanço e a profundidade de corte para os dois materiais em estudo

Profundidade de corte [μm]	Avanço [μm/rot]	Aço					Alumínio				
		Medidas [mm]			Δd	β [°]	Medidas [mm]			Δd	β [°]
		Base	Meio	Topo			Base	Meio	Topo		
300	12,5	2,008	2,010	2,011	0,003	0,009	1,983	1,988	1,995	0,012	0,025
	25	2,000	2,001	2,007	0,007	0,020	2,002	2,006	2,010	0,008	0,023
	50	2,005	2,023	2,074	0,069	0,198	2,006	2,036	2,084	0,078	0,223
	100	2,035	2,053	2,086	0,051	0,146	2,018	2,026	2,064	0,046	0,132
100	12,5	1,954	1,966	1,977	0,023	0,066	1,993	1,998	2,020	0,027	0,078
	25	1,953	1,964	1,988	0,035	0,101	1,970	1,982	2,014	0,044	0,126
	50	2,014	2,022	2,038	0,024	0,069	2,026	2,034	2,071	0,045	0,129
	100	2,083	2,093	2,102	0,019	0,059	2,062	2,080	2,144	0,083	0,238
50	12,5	2,007	2,008	2,012	0,005	0,015	1,992	1,994	2,002	0,010	0,028
	25	2,002	2,004	2,011	0,009	0,026	1,997	2,004	2,020	0,023	0,066
	50	2,011	2,018	2,032	0,021	0,060	2,036	2,044	2,052	0,015	0,043
	100	2,016	2,028	2,052	0,036	0,103	2,047	2,055	2,069	0,022	0,063

**A 2: Rugosidades obtidas para a ferramenta de sangrar, a ferramenta rômica 55° afiada, a ferramenta triangular e a ferramenta rômica 55° sendo P em µm, a em µm/rot e os valores das rugosidades em µm**

Ferramenta de sangrar				Ferramenta rômica 55° afiada			Ferramenta triangular			Ferramenta rômica 55°		
Parâmetros de corte	P=100 a=25	P=100 a=12,5	P=50 a=25	P=100 a=25	P=100 a=12,5	P=50 a=25	P=100 a=25	P=100 a=12,5	P=50 a=25	P=100 a=25	P=100 a=12,5	P=50 a=25
Alumínio				Alumínio			Alumínio			Alumínio		
Ra	0,50	0,38	0,75	1,88	0,88	1,42	0,91	0,95	0,69	0,47	0,92	0,74
RzD	2,72	2,36	3,51	12,80	4,23	9,61	4,71	4,85	4,15	2,84	5,30	4,60
RzI	3,58	2,56	3,72	14,62	4,57	10,36	5,21	5,27	4,56	3,32	5,86	5,09
RmD	3,80	2,74	4,01	16,75	4,92	11,35	5,26	5,75	4,86	3,68	6,23	5,55
Rt	4,03	2,87	4,15	16,75	5,19	11,40	5,61	4,87	5,09	4,04	6,46	5,63
Rp	2,05	1,15	1,78	9,33	2,74	6,21	2,99	2,64	2,61	1,85	3,01	2,64
Rpm	1,28	1,02	1,59	7,14	2,05	5,30	2,38	1,91	2,05	1,30	2,48	2,19
Rq	0,64	0,46	0,86	2,38	1,02	1,78	1,09	1,12	0,86	0,58	1,15	0,91
R3z	2,19	2,01	3,17	10,46	3,37	8,13	4,09	4,12	3,54	2,20	4,56	3,93
Pt	7,16	3,86	5,41	19,09	6,04	13,91	8,02	6,94	7,04	6,27	11,70	7,72
Pc	49	60	1406	654	41	566	387	113	144	36	225	157
Sm	244,03	449,73	16,02	38,40	548,07	40,22	198,34	320,03	403,34	638,40	137,05	147,01
Aço				Aço			Aço			Aço		
Ra	1,08	2,12	0,48	2,49	6,44	2,80	4,15	3,40	2,11	1,63	1,43	1,24
RzD	6,69	11,54	4,22	16,81	35,09	19,36	24,80	18,90	12,26	10,68	8,73	8,94
RzI	7,65	16,60	5,06	18,15	43,06	21,48	30,39	23,44	13,83	12,44	10,73	10,29
RmD	8,84	15,96	5,20	19,79	44,38	24,98	30,71	26,81	13,76	14,10	11,52	11,08
Rt	8,94	19,10	5,66	20,67	48,51	24,98	32,58	27,44	14,80	14,75	12,59	11,28
Rp	3,53	9,89	1,79	9,47	25,54	11,77	16,27	14,83	6,21	5,60	4,96	4,57
Rpm	2,63	6,00	1,15	8,04	16,65	9,17	11,66	8,71	4,66	4,06	3,56	3,75
Rq	1,36	2,80	0,66	3,14	8,02	3,58	5,40	4,36	2,68	2,15	1,86	1,65
R3z	5,44	8,97	2,52	13,05	20,01	14,21	14,36	13,13	7,80	5,88	4,97	6,00
Pt	10,05	25,45	6,65	21,65	52,84	28,19	32,69	31,80	18,00	15,93	18,66	12,51
Pc	233	167	42	445	91	451	150	104	59	57	41	139
Sm	121,94	221,57	449,73	60,95	248,83	59,64	273,18	217,35	386,83	404,92	555,11	163,25

**A 3: Medidas e ângulos de conicidade das peças com acabamento, utilizando as ferramentas rômbica 55°, rômbica 55° afiada, triangular e de sangrar, tendo em conta o avanço e a profundidade de corte para os dois materiais em estudo**

Ferramenta utilizada	Profundidade de corte [ $\mu\text{m}$ ]	Avanço [ $\mu\text{m}/\text{rot}$ ]	Aço					Alumínio				
			Medidas [mm]			$\Delta d$	$\beta$ [°]	Medidas [mm]			$\Delta d$	$\beta$ [°]
			Base	Meio	Topo			Base	Meio	Topo		
Rômbica 55°	100	12,5	1,954	1,966	1,977	0,023	0,066	1,993	1,998	2,020	0,027	0,077
		25	1,953	1,964	1,988	0,035	0,101	1,970	1,982	2,014	0,044	0,126
	50	25	2,002	2,004	2,011	0,009	0,026	1,997	2,004	2,020	0,010	0,066
Rômbica 55° afiada	100	12,5	2,075	2,082	2,093	0,018	0,052	2,047	2,049	2,060	0,013	0,037
		25	1,990	1,994	2,001	0,011	0,032	1,991	1,993	2,007	0,016	0,046
	50	25	2,043	2,045	2,046	0,003	0,009	2,036	2,039	2,051	0,015	0,043
Triangular	100	12,5	2,086	2,089	2,101	0,015	0,043	2,083	2,085	2,095	0,012	0,035
		25	2,072	2,080	2,098	0,026	0,075	2,042	2,047	2,060	0,018	0,052
	50	25	2,026	2,030	2,046	0,020	0,058	2,018	2,025	2,039	0,021	0,060
Sangrar	100	12,5	1,979	1,989	1,991	0,012	0,035	2,004	2,015	2,027	0,023	0,066
		25	2,074	2,077	2,081	0,007	0,020	2,080	2,086	2,098	0,018	0,052
	50	25	2,093	2,095	2,099	0,06	0,017	2,086	2,090	2,098	0,012	0,035

A 4: Rugosidades obtidas para a ferramenta de sangrar e para a ferramenta rômica 55°, com e sem lubrificação, sendo P em µm, a em µm/rot e as rugosidades em µm

Ferramenta de sangrar				Ferramenta rômica 55°			Ferramenta de sangrar com lubrificação			Ferramenta rômica 55° com lubrificação		
Parâmetros de corte	P=100 a=25	P=100 a=12,5	P=50 a=25	P=100 a=25	P=100 a=12,5	P=50 a=25	P=100 a=25	P=100 a=12,5	P=50 a=25	P=100 a=25	P=100 a=12,5	P=50 a=25
Alumínio				Alumínio			Alumínio			Alumínio		
Ra	0,50	0,38	0,75	0,47	0,92	0,74	0,40	0,60	0,83	1,31	1,45	1,36
RzD	2,72	2,36	3,51	2,84	5,30	4,60	2,41	3,40	3,97	8,75	8,15	8,56
RzI	3,58	2,56	3,72	3,32	5,86	5,09	2,74	3,63	4,33	9,89	9,86	9,41
RmD	3,80	2,74	4,01	3,68	6,23	5,55	3,00	3,88	4,37	10,50	10,14	9,75
Rt	4,03	2,87	4,15	4,04	6,46	5,63	3,21	3,93	4,82	11,20	10,52	10,93
Rp	2,05	1,15	1,78	1,85	3,01	2,64	1,15	1,81	2,47	5,10	5,71	5,27
Rpm	1,28	1,02	1,59	1,30	2,48	2,19	0,95	1,57	1,96	3,91	4,13	4,01
Rq	0,64	0,46	0,86	0,58	1,15	0,91	0,48	0,70	0,96	1,62	1,83	1,68
R3z	2,19	2,01	3,17	2,20	4,56	3,93	1,92	2,93	3,59	6,76	6,95	6,62
Pt	7,16	3,86	5,41	6,27	11,70	7,72	4,88	5,22	6,35	15,23	13,79	16,43
Pc	49	60	1406	36	225	157	13	522	1379	719	657	616
Sm	244,03	449,73	16,02	638,40	137,05	147,01	261,38	50,27	16,40	74,78	169,31	105,74
Aço				Aço			Aço			Aço		
Ra	1,08	2,12	0,48	1,63	1,43	1,24	1,64	1,24	1,05	1,75	2,34	2,08
RzD	6,69	11,54	4,22	10,68	8,73	8,94	9,41	8,22	6,84	11,96	15,70	14,48
RzI	7,65	16,60	5,06	12,44	10,73	10,29	13,47	9,22	7,90	12,91	16,86	16,70
RmD	8,84	15,96	5,20	14,10	11,52	11,08	14,15	10,43	8,68	14,79	17,65	18,46
Rt	8,94	19,10	5,66	14,75	12,59	11,28	14,78	10,73	9,25	14,87	19,68	18,86
Rp	3,53	9,89	1,79	5,60	4,96	4,57	6,31	4,44	4,62	7,95	11,39	11,62
Rpm	2,63	6,00	1,15	4,06	3,56	3,75	4,24	3,68	3,20	6,58	9,19	8,53
Rq	1,36	2,80	0,66	2,15	1,86	1,65	2,00	1,52	1,31	2,17	2,97	2,64
R3z	5,44	8,97	2,52	5,88	4,97	6,00	7,85	6,34	5,06	9,05	9,67	11,16
Pt	10,05	25,45	6,65	15,93	18,66	12,51	16,46	12,83	12,81	15,26	23,30	19,22
Pc	233	167	42	57	41	139	1229	888	56	846	251	714
Sm	121,94	221,57	449,73	404,92	555,11	163,25	18,90	29,95	357,24	79,05	207,55	45,79

**A 5: Medidas e ângulos de conicidade das peças com acabamento, utilizando as ferramentas rômbica 55° e de sangrar, com e sem lubrificação, tendo em conta o avanço e a profundidade de corte para os dois materiais em estudo**

Ferramenta utilizada	Profundidade de corte [ $\mu\text{m}$ ]	Avanço [ $\mu\text{m}/\text{rot}$ ]	Aço					Alumínio				
			Medidas [mm]			$\Delta d$	$\beta$ [°]	Medidas [mm]			$\Delta d$	$\beta$ [°]
			Base	Meio	Topo			Base	Meio	Topo		
Rômbica 55°	100	12,5	1,954	1,966	1,977	0,023	0,076	1,993	1,998	2,020	0,027	0,077
		25	1,953	1,964	1,988	0,035	0,101	1,970	1,982	2,014	0,044	0,126
	50	25	2,002	2,004	2,011	0,009	0,026	1,997	2,004	2,020	0,010	0,066
Rômbica 55° com lubrificação	100	12,5	2,040	2,046	2,052	0,012	0,035	2,006	2,020	2,024	0,018	0,052
		25	1,986	1,992	1,998	0,012	0,035	2,051	2,061	2,063	0,012	0,035
	50	25	2,003	2,011	2,019	0,016	0,046	2,023	2,028	2,030	0,007	0,020
Sangrar	100	12,5	1,979	1,989	1,991	0,012	0,035	2,004	2,015	2,027	0,023	0,066
		25	2,074	2,077	2,081	0,007	0,020	2,080	2,086	2,098	0,018	0,052
	50	25	2,093	2,095	2,099	0,06	0,017	2,086	2,090	2,098	0,012	0,035
Sangrar com lubrificação	100	12,5	2,040	2,046	2,059	0,019	0,055	1,991	1,998	2,008	0,017	0,048
		25	1,997	2,007	2,020	0,023	0,076	1,962	1,971	1,979	0,017	0,048
	50	25	2,089	2,104	2,111	0,022	0,063	1,961	1,970	1,975	0,014	0,040